

UTILISATION
DES
EAUX SALINES

Compte rendu de recherches

U N E S C O

RECHERCHES SUR LA ZONE ARIDE — IV
UTILISATION DES EAUX SALINES :
COMPTE RENDU DE RECHERCHES

Dans cette collection :

- I. *Compte rendu des recherches relatives à l'hydrologie de la zone aride.*
- II. *Actes du colloque d'Ankara sur l'hydrologie de la zone aride.*
- III. *Directory of Institutions Engaged in Arid Zone Research (en anglais seulement).*
- IV. *Utilisation des eaux salines : Compte rendu de recherches.*
- V. *Plant Ecology. Proceedings of the Montpellier Symposium / Écologie végétale : Actes du colloque de Montpellier.*
- VI. *Plant Ecology. Reviews of Research / Écologie végétale : Compte rendu de recherches.*
- VII. *Wind and Solar Energy. Proceedings of the New Delhi Symposium / Énergie solaire et éolienne : Actes du colloque de New Delhi / Energia solar y eólica : Actas del coloquio celebrado en Nueva Delhi.*
- VIII. *Human and Animal Ecology. Reviews of Research / Écologie animale et humaine : Compte rendu de recherches.*

En préparation :

- IX. *Guidé des travaux de recherches sur la mise en valeur des régions arides.*

A partir de 1955, les comptes rendus de recherches sont publiés sous couverture jaune, les Actes des colloques sous couverture grise.

Publié en 1957
par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science
et la culture, 19, avenue Kléber, Paris-16^e.
Imprimé par l'Imprimerie Chaix, 20, rue Bergère, Paris-9^e.



TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos.	7
Avant-propos de la deuxième édition	9
Les problèmes biologiques relatifs aux plantes tolérant l'eau salée ou saumâtre, et à l'utilisation d'une telle eau pour l'irrigation, par Georges Grillot.	11
La croissance des plantes en milieu salin, par H.E. Hayward	39
L'utilisation de l'eau de mer, par Everett D. Howe	77
Index des matières	107

A V A N T - P R O P O S

LE programme de l'Unesco relatif à la zone aride, dont la mise en œuvre a commencé en 1951, est appliqué sous la direction du Comité consultatif de recherches sur la zone aride, qui comprend neuf membres de nationalité différente. Chaque année, ce comité choisit un sujet d'intérêt majeur, qui bénéficie d'une attention particulière dans toutes les activités ressortissant au programme en question. En 1951, ce sujet était l'hydrologie de la zone aride, en particulier les eaux souterraines; en 1952, l'écologie végétale de la zone aride a été retenue; en 1953, le choix s'est porté sur les ressources énergétiques de la zone aride et leur utilisation, et, en 1954, sur l'écologie humaine et animale de la zone aride.

Toutefois, à côté de ces problèmes fondamentaux, il en existe beaucoup d'autres qui, s'ils ne méritent pas que les efforts de toute une année leur soient essentiellement consacrés, présentent pourtant une grande importance. C'est pourquoi le Comité consultatif, lors de sa deuxième session, en septembre 1951, a recommandé que, si des fonds supplémentaires devenaient disponibles, le Directeur général fasse établir des rapports rendant compte des recherches déjà consacrées à diverses questions, parmi lesquelles figurait l'utilisation de l'eau salée.

Vers la fin de 1951, la possibilité est apparue de faire rédiger trois rapports sur l'utilisation de l'eau salée; ce sont ces rapports qui sont publiés dans le présent volume.

Lorsque ces rapports ont été demandés, on a reconnu la nécessité de traiter séparément deux aspects de cette question. D'une part, il y a l'utilisation directe des eaux salines pour la culture des plantes, les réactions et les tolérances des différentes espèces végétales à l'eau salée, les effets que ces eaux exercent sur la vie végétale suivant le degré de concentration des ions qu'elles contiennent — autrement dit, les aspects biologiques du problème. D'autre part, il y a les méthodes d'adoucissement des eaux contenant beaucoup de sels, en vue de les rendre propres à l'irrigation et à la consommation humaine.

Au sujet des problèmes biologiques qui ont trait à l'utilisation de l'eau salée, on a demandé au Dr Hayward, directeur du United States Salinity Laboratory de River-

side (Californie), d'exposer les recherches consacrées à cette question dans les Amériques, en Australie et en Inde, et à M. Georges Grillot, chef du Service de la recherche agronomique au Maroc, d'exposer celles qui ont été faites en Afrique, en Europe et au Moyen-Orient.

Comme l'écrit le Dr Hayward dans l'introduction à son étude, le problème de la salinité est commun à beaucoup de régions arides. Ailleurs, les précipitations suffisent en temps normal à lessiver les sels que contient le sol et à fournir aux végétaux l'eau dont ils ont besoin. En revanche, dans les régions arides où les taux d'évaporation sont élevés, les précipitations ne réduisent pas le taux de salinité du sol, et il arrive trop souvent que l'eau dont on dispose pour l'irrigation contienne elle-même beaucoup de sels. Le botaniste doit donc collaborer ici avec l'hydrologue et le chimiste pour déterminer la façon dont il convient d'utiliser le sol et l'eau dont on dispose. Les problèmes biologiques que pose l'utilisation de l'eau salée constituent un lien entre les travaux que le Comité consultatif a consacrés d'une part, en 1951, à l'hydrologie, et d'autre part, en 1952, à l'écologie végétale.

L'importance qui s'attache au problème de l'adoucissement de l'eau salée ressort, de manière particulièrement éclatante, de la récente décision du gouvernement des États-Unis d'Amérique qui, par la Public Law n° 448, a institué un programme d'assistance aux projets de recherches propres à donner des résultats intéressants dans le domaine en question. Les parties arides de la côte pacifique des États-Unis ont été éprouvées, ces dernières années, par une sécheresse exceptionnelle; aussi estime-t-on que, pour assurer l'avenir de cette région, il est particulièrement important de trouver une méthode rentable de purification des eaux salées ou saumâtres, et que ce problème mérite un effort national. Le Dr Everett D. Howe, Associate Dean de la faculté des sciences de l'ingénieur de l'Université de Californie, à qui l'on doit de nombreux travaux de cet ordre, passe en revue dans le présent volume les résultats publiés des recherches qu'on a effectuées jusqu'ici sur les méthodes de purification. La solution de ce problème présente évidemment un intérêt considérable

pour les nombreuses régions arides qui, dans le monde entier, sont voisines de la mer, ainsi que pour les régions dont les ressources en eaux souterraines sont actuellement peu utilisables en raison de leur forte salinité.

Le Secrétariat de l'Unesco et son Comité consultatif

de recherches sur la zone aride remercient les auteurs des rapports réunis dans le présent volume ; ils espèrent que cet ouvrage sera utile aux chercheurs, aux administrateurs et à tous ceux qui s'occupent des régions arides ou semi-arides du globe, qu'ils s'y intéressent.

AVANT-PROPOS DE LA DEUXIÈME ÉDITION

LA première édition de cet ouvrage a paru¹ en 1954, mais les trois rapports qu'elle contenait avaient été rédigés en 1952. Depuis cette date, de nombreuses recherches ont été consacrées aux problèmes de l'adoucissement de l'eau salée. Le Salt Water Conversion Programme, institué aux États-Unis d'Amérique sur l'initiative du Département de l'intérieur, a puissamment contribué à attirer l'attention des chercheurs sur la gravité de ce problème. De même, la création par l'Organisation européenne de coopération économique (O.E.C.E.) d'un groupe de travail sur le dessalement des eaux saumâtres a suscité l'élaboration de divers projets prévoyant

la coopération de plusieurs États membres de cette organisation.

C'est pourquoi on a profité de la réédition de cet ouvrage pour demander au professeur Everett D. Howe de réviser et de mettre à jour la partie qui a trait à l'utilisation de l'eau de mer. Il n'a pas semblé que les deux autres chapitres eussent actuellement besoin d'être revus; aussi sont-ils reproduits dans cette deuxième édition tels qu'ils figuraient dans la première.

1. En anglais seulement.

LES PROBLÈMES BIOLOGIQUES RELATIFS AUX PLANTES TOLÉRANT L'EAU SALÉE OU SAUMATRE, ET A L'UTILISATION D'UNE TELLE EAU POUR L'IRRIGATION

(Europe - Afrique - Moyen-Orient)

par

GEORGES GRILLOT

Correspondant de l'Académie d'agriculture de France,
chef du Service de la recherche agronomique au Maroc

INTRODUCTION

L'eau saumâtre contient, en proportions variables et en dissolution plus ou moins concentrée, divers sels : chlorures, sulfates, carbonates, bicarbonates de sodium, calcium et magnésium. S'y ajoutent parfois, d'une part les nitrates [174, 175]¹ et les borates [200], d'autre part le potassium [60]. Le terme « salé » semble indiquer la prédominance du chlorure de sodium.

Les problèmes relatifs aux plantes qui tolèrent l'eau salée ou saumâtre ne constituent qu'un chapitre de la question des matières minérales en physiologie et biologie végétales.

Les problèmes relatifs à l'utilisation des eaux salées

ou saumâtres pour l'irrigation ne sont que des corollaires des précédents, mais leur caractère théoriquement secondaire ne leur enlève rien de leur importance pratique.

L'heureuse solution des uns et des autres est fonction d'une connaissance aussi complète que possible des relations complexes qui s'établissent entre l'eau, les sels, le sol et sa solution, la microflore, et la végétation elle-même, toutes les réactions en cause se trouvant en outre sous la dépendance des facteurs climatiques et sous l'influence des travaux — et des erreurs — de l'homme.

PHYSIOLOGIE VÉGÉTALE : LES SELS ET LA PLANTE

LES ÉLÉMENTS MINÉRAUX DES SELS ET LEUR RÔLE DANS LA PLANTE [31, 51, 55, 61, 115, 165]

Outre les quatre éléments plastiques fondamentaux : C, O, H et N, on trouve dans les végétaux les principaux éléments minéraux suivants [61] : P, S, K, Na, Mg, Si, Fe, Mn, auxquels peuvent, en proportions minimes, s'en ajouter bien d'autres, soit au total 31 éléments dont certains apparaissent nécessaires, et les autres indifférents [215].

Le *chlore*, sous forme de chlorures, maintient la pression osmotique cellulaire. Sa nécessité reste toutefois à démontrer.

Le *soufre* se trouve chez tous les végétaux à un taux souvent comparable à celui du phosphore [115]. Il entre dans la composition des protéides ; il agit favorablement sur la formation du pigment chlorophyllien [51].

On n'insistera ici, ni sur le *carbone*, ni sur l'*azote*, éléments plastiques fondamentaux d'indiscutable nécessité, fournis à la plante, l'un par l'assimilation chlorophyllienne, l'autre par l'absorption radiculaire des nitrates, ni sur le *bore*, oligo-élément qui devient toxique à très faible dose, mais qui, dans le Vieux Monde, n'a pas été, à notre connaissance, signalé comme un élément dangereux des eaux d'irrigation.

1. Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie, en fin d'article.

Le potassium est un élément indispensable, nutritif et de synthèse, qui forme 25 à 50 % des cendres de la plante, et qu'on trouve dans tous les tissus doués de grande vitalité ainsi que dans les organes de réserve.

Le sodium [31] est présent chez tous les végétaux [24]. Quoique sa nécessité ne soit pas encore tenue pour évidente [115], on admet que, pour certaines fonctions [165] : neutralisation d'acides et surtout maintien d'une pression osmotique suffisante, le sodium peut être utilisé par la plante, soit normalement, soit à la place de n'importe quel autre élément [51], en particulier du potassium.

D'après Dassonville, il hâterait la lignification et préviendrait ainsi la verse des céréales.

Toutes les plantes n'absorbent d'ailleurs pas le sodium avec la même facilité, et, d'après Van Schreven, son influence sur la betterave n'est significative qu'en milieu carencé en potassium [56].

Le calcium [165] intervient dans la migration des glucides et la neutralisation des acides. Il existe aussi dans les membranes celluloses sous forme de pectates.

Le magnésium [115, 165] est un constituant permanent des végétaux. Il s'y trouve en combinaisons organiques dans la chlorophylle et diverses substances cellulaires, et il intervient dans l'assimilation du phosphore [31].

En résumé tous ces éléments sont utiles ou indispensables, à l'exception peut-être du chlore et du sodium. Ils ne deviennent dangereux qu'à dose excessive.

L'ABSORPTION DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX ET LES ÉQUILIBRES IONIQUES

Les éléments minéraux de la plante proviennent, dans certains cas, peut-être directement du complexe absorbant du sol [61], mais en règle générale de la solution qui baigne les racines et dans laquelle les sels sont plus ou moins dissociés. Ils pénètrent dans la cellule végétale par sa paroi dont la perméabilité augmente avec la température et avec la lumière, et varie avec l'âge des plantes, les cellules adultes étant bien moins perméables que les jeunes et les vieilles [31]. En outre, il se produit un choix des ions, si bien que, parmi les ions dissociés d'un même sel, l'un peut passer, et l'autre non [215], ou bien ils ne pénètrent pas dans la cellule avec la même rapidité [31].

La vitesse de pénétration est plus grande pour les ions monovalents que pour les polyvalents [60, 61]. Les ions agissent sur la perméabilité cellulaire, de sorte que la pénétration de l'ion Cl^- par exemple varie suivant le cation qui lui est associé. Elle est maximum

pour NaCl [61]. La pénétration d'un élément provenant de la solution d'un seul sel, dans la cellule, est logarithmiquement proportionnelle à sa concentration dans la solution, mais il n'en est pas nécessairement de même pour un mélange [57] tel que la solution du sol.

Selon Olsen [172], le nombre total d'ions, exprimé en milliéquivalents, absorbés pendant l'unité de temps par une plante donnée est constant tant que l'on maintient dans la solution les mêmes proportions entre les concentrations des différents ions ; la vitesse d'absorption de chaque ion est déterminée par les rapports entre ces concentrations et non par la concentration absolue des ions.

Les rapports entre éléments sont donc plus importants pour la plante que les quantités de chacun d'eux qui lui sont offertes. En aucun cas cependant, dans les expériences de Reifenberg sur plantules d'orge, la présence de Na^+ n'a gêné l'absorption de K^+ . Par contre, celle de Na^+ a été empêchée par K^+ proportionnellement aux taux de potassium présent. Les chlorures n'ont pas gêné l'absorption des nitrates, ni du phosphore ; par contre, la présence du phosphore réduit considérablement l'absorption de Cl^- , sauf dans le cas de fortes concentrations du chlore [191, 192].

Il est donc très important que la solution du sol soit convenablement composée, donc bien « équilibrée ». Cette notion essentielle ne doit pas être perdue de vue lors de l'utilisation combinée des eaux salées, des amendements et des fumures sur un sol donné et pour une culture déterminée. On doit tenir compte également du fait que l'équilibre électrostatique entre la plante et le milieu, troublé par l'inégale absorption des ions, tend à être rétabli par la plante elle-même, c'est-à-dire par ses échanges ioniques avec le milieu, et par sa respiration [192] plus active en milieu salin à pression osmotique élevée parce que la plante doit y dépenser davantage d'énergie pour absorber eau et sels [200]. L'aération des sols salins joue donc un rôle important dans le développement des plantes.

D'autre part, si l'osmose intervient dans l'absorption d'eau par la plante, elle ne peut seule assurer la pénétration des ions dans la cellule végétale dont la pression osmotique est, en général, bien plus élevée que celle de la solution du sol [61].

La sélection et l'absorption des ions, variables suivant les espèces végétales, le développement de la plante et les conditions du milieu, semblent donc résulter de phénomènes très complexes [50, 52, 61, 173] : imbibitions et désimbitions des membranes, absorption, combinaisons chimiques, en fonction des propriétés physico-chimiques et électriques des colloïdes cellulaires, de l'irritabilité et des mouvements du protoplasme, de la réaction chimique différente des milieux extérieur et interne, etc., la pression osmotique n'intervenant que de façon infime, d'après Pantanelli, et seulement en solution extérieure isotonique ou hypertonique.

TOXICITÉ ET ANTITOXICITÉ

Les effets d'une substance toxique varient dans leurs manifestations et dans leur intensité avec la nature de la substance et suivant sa concentration dans la solution extérieure. Même les éléments indispensables à la vie végétale sont toxiques en solutions trop concentrées, tandis que des poisons violents extrêmement dilués sont inoffensifs ou peuvent avoir une action oligodynamique favorable.

Les effets toxiques d'une même substance à une même dose sont variables suivant l'espèce et l'état de développement du végétal.

Coupin a déterminé le « seuil de toxicité » de différentes substances minérales et il a exprimé la toxicité de chacune par son « équivalent toxique », qui est la quantité minimum de substance qui, dissoute dans 100 cm³ d'eau, empêche la germination d'une espèce donnée [53, 165].

Or, un même ion peut être assimilable ou au contraire plus ou moins toxique, suivant le sel dans lequel il se trouve engagé.

Dans le classement qu'a fait Coupin [54] de diverses substances d'après leur équivalent toxique, on trouve, parmi les moyennement toxiques : sulfates de sodium et de magnésium, chlorure de magnésium ; parmi les faiblement toxiques : carbonate et nitrate de sodium, chlorures de sodium, de potassium et d'ammonium, sulfate de potassium.

Puis, Paulesco [161] constata en 1902 que la molécule des divers chlorures alcalins produisait le même effet sur la levure de bière.

Les causes d'intoxication sont difficiles à connaître et plusieurs peuvent agir simultanément.

C'est tantôt la pénétration dans la cellule de la substance toxique ionisée, tantôt l'impossibilité ou la difficulté de cette pénétration, qui provoquent l'intoxication.

D'après Lundegardh [107], les cations monovalents dispersent les colloïdes cellulaires et désorganisent le protoplasme, tandis que les bivalents (surtout Ca) seraient coagulants et réduiraient la perméabilité de la membrane.

Selon Molliard, CaCl₂ est rapidement toxique parce qu'il provoque la plasmolyse, sa limite inférieure d'action toxique étant N/10.

Maume et Dulac [161] signalent la « toxicité physiologique » qui résulte du déséquilibre ionique des milieux nutritifs.

Osterhout, ayant mélangé en proportions variables deux solutions d'égale toxicité, l'une de NaCl, l'autre de CaCl₂, constata que les mélanges étaient moins toxiques que les solutions pures et que la croissance racinaire était maximum dans le mélange qui comprenait seulement 5 % de la solution de CaCl₂ et 95 % de celle de NaCl [165].

Maume et Dulac ont ensuite calculé que ces pro-

portions correspondaient aux quantités de chacun des deux sels qui fourniraient, si elles étaient séparément dissoutes dans un volume d'eau égal à celui du mélange, des solutions ayant l'une et l'autre le même coefficient de dissociation moléculaire [159, 160, 161].

Des effets analogues d'antitoxicité par antagonisme positif peuvent être obtenus par mélange de solutions inégalement toxiques et aussi par mélange d'une substance toxique et d'une autre qui ne l'est pas [165].

Entre cations de même valence, comme Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺, l'antagonisme est sensiblement moins accusé ; il est cependant bien marqué pour K⁺ et Na⁺.

Dans les conditions naturelles de développement des plantes supérieures, ce sont les sels de calcium qui paraissent avoir le rôle antitoxique le plus important [165].

On a également signalé des antagonismes entre anions, par exemple pour la betterave, les sulfates s'opposent à l'absorption des chlorures. Barbier a constaté que, pour l'avoine, NO₃ a une action analogue, mais non réciproque, vis-à-vis de Cl.

En définitive, l'antagonisme positif à effet antitoxique met en évidence la sensibilité du végétal à l'égard des équilibres ioniques dans les solutions. Il serait donc intéressant, comme l'ont écrit Maume et Dulac [161], de connaître les pNa, pCa, pK, etc., des sols et leurs solutions, tout comme leur pH.

LES EFFETS DES SELS SUR LES VÉGÉTAUX

Les données fondamentales étant rappelées, il convient d'examiner les effets des sels.

EFFETS SPÉCIFIQUES

On peut, suivant Russell [200], classer les sels en deux catégories, selon qu'ils agissent sur les plantes à faible ou à forte concentration.

Dans la première catégorie, deux sortes de sels seulement sont à retenir : le carbonate de sodium et, plus rarement, les borates solubles.

Les borates sont directement toxiques.

Le carbonate de sodium a été reconnu par Coupin comme peu toxique, mais ses graves effets pratiques sont imputables aux conséquences du pH élevé qu'il communique au sol ; beaucoup d'éléments nutritifs : P, Fe, Zn, Mn, deviennent alors inassimilables par les plantes, en même temps que le sol devient imperméable, mal aéré, visqueux et presque impossible à travailler, impropre à la végétation.

À fortes concentrations, les autres sels peuvent avoir sur les plantes des effets toxiques d'intensités différentes suivant les ions.

Maesewa et de Sigmond ont contribué à démontrer la toxicité des concentrations trop élevées de calcium et de magnésium.

Le plus souvent, c'est le sodium qui, soit par l'abondance du chlorure, soit par l'apparition du carbonate, joue le rôle principal dans la nocivité des milieux salins ou alcalins à l'égard des végétaux.

L'effet nuisible de hautes teneurs en ions Na^+ de sols par ailleurs très pauvres en calcium est dû au fait que la culture souffre alors de déficience en calcium [200]. C'est le rapport Na/Ca dans la solution qu'il faut incriminer plus que la concentration absolue en Na [114].

En ce qui concerne les anions, Russell écrit [200] que les pêchers et les haricots sont endommagés par les chlorures dans la solution du sol à des pressions osmotiques auxquelles les sulfates ne leur nuisent pas, cependant que le lin et diverses plantes fourragères souffrent moins de la présence des chlorures que de celle des sulfates, à égale pression osmotique.

EFFETS GÉNÉRAUX DE LA SALINITÉ

Selon Russell [200], les plantes poussant dans un sol contenant une teneur appréciable en sels solubles peuvent accumuler dans leurs tissus des quantités considérables de sels minéraux atteignant parfois 50 % de la matière sèche.

Il y a en outre, apparemment, corrélation inverse entre le développement de la plante et sa teneur en

sels, laquelle est plus forte dans les feuilles que dans les tiges [152].

Une forte salure est, d'après Lesage [145], accompagnée chez les plantes qui s'en accommodent mal d'une diminution de la chlorophylle et de l'amidon. Il n'est cependant pas possible, d'après Schuphan [107] d'énoncer, à cause des réactions très différentes des diverses espèces, de conclusions à propos de l'effet des chlorures sur le métabolisme des hydrates de carbone.

Chez les halophytes, les cellules contiennent beaucoup de sels et, de ce fait, leur pression osmotique peut atteindre des valeurs très élevées, dépassant parfois 40 atmosphères dans les racines [120, 121] et 80 dans les feuilles [2], voire 100, d'après Fitting [107].

Il n'y a d'ailleurs pas, d'après Killian [121], de rapport fixe entre la pression osmotique des racines et celle des feuilles, toujours plus élevée.

La pression osmotique est avant tout fonction de la spécificité et de l'individualité de la plante, mais elle subit des variations suivant les lieux, les saisons et les heures parce que la teneur du sol en chlorures ainsi que la sécheresse jouent à ce sujet un rôle positif important [121, 125].

La pression osmotique cellulaire élevée due à la présence des sels réduit la transpiration [1, 2, 48, 69].

D'autre part, les sels accroissent la force de succion du sol pour l'eau et la pression osmotique de la solution qui baigne les racines, de sorte que, plus il y a de sels dans le sol, moins il peut pénétrer d'eau dans la plante [200].

BIOLOGIE VÉGÉTALE :

LA PLANTE EN MILIEU SALIN OU ALCALIN

SOLS SALINS ET ALCALINS

SALINISATION DES SOLS ET ÉVOLUTION DES SOLS SALINS

Les terres salées sont des terres basses disputées à la mer immédiatement voisine et riches en chlorure de sodium, ou bien des terres de régions plus ou moins arides et chaudes, où les pluies sont insuffisantes pour entraîner vers la profondeur les sels qui imprègnent le sol. Dans ce dernier cas, il s'agit souvent de bas-fonds imperméables qui collectent les eaux plus ou moins salées, lesquelles s'évaporent en abandonnant leurs sels dans le sol.

Volubuef [234] a distingué plusieurs types de salure suivant les proportions des divers ions.

Le pouvoir coagulant de Na^+ étant inférieur à celui

des autres cations, la substitution dans le complexe absorbant du sol de l'ion Na^+ à l'ion Ca^{++} , qui se produit quand la solution du sol est riche en Na^+ , se révèle peptisante dès que la solution, pour une raison quelconque (pluie ou irrigation), devient moins concentrée [101, 221].

Selon Demolon, avec 10 % de Na^+ dans le complexe du sol, on observe déjà des effets fâcheux sur le sol lors de son irrigation ; s'il y en a 40 %, toute irrigation devient impossible [60]. Il s'agit là de pourcentages de Na^+ par rapport au total des cations du complexe, calculés d'après les milliéquivalents.

Il ne convient donc pas d'irriguer, surtout avec de l'eau riche en Na^+ , les terres solonchocoides où le sodium représente une fraction égale ou supérieure à 15 % du total des cations échangeables du complexe absorbant [97].

L'effet fâcheux de la dispersion des colloïdes est

accentué, du fait de la libération des ions Na^+ du complexe, par la formation de CO_3Na_2 dans la solution du sol [200] et l'élévation consécutive du pH du sol qui accroît la défloculation, l'imperméabilité et la stérilisation du sol. (Voir annexe I : classification des sols salins et alcalins d'après de Sigmond [207].)

La relation entre la teneur en sels d'un sol et sa fertilité résulte donc principalement de l'effet des sels de sodium sur la structure du sol [92] et, pour un même horizon, il y a une corrélation inverse accentuée entre la teneur en sels et la teneur en humus du sol [117].

Drouineau [68] a récemment montré que l'alcalinisation d'un sol très peu salé peut se produire quand son drainage est défectueux.

Le magnésium peut parfois jouer le même rôle que le sodium dans l'alcalinisation des terres [200].

Enfin, les plantes elles-mêmes interviennent par leur absorption sélective et par l'action de leurs racines sur la structure du sol, dans l'évolution des sols et la distribution des sels [23, 140, 155].

SOLONTCHAKS, SOLONETZ ET SOLODS

Les sols salins, ou solontchaks, conservent les caractères des types pédogénétiques propres à la zone climatique considérée, sauf en surface et quand la salure y devient telle que les sels (plus ou moins hygroscopiques) se précipitent [100, 200].

Mais il ne peut se former et se conserver de solontchaks que sous climat sec, car sous climat humide commence aussitôt l'alcalinisation ou plus exactement la solonetzification de ces sols.

Les solonetz sont plus ou moins basiques ; plastiques et visqueux à l'état humide, formant des mottes dures et compactes à l'état sec [49, 56, 58], ils sont asphyxiants, réducteurs [46], souvent stériles [18].

Quand le lessivage d'un solonetz décalcifié arrive à son stade ultime (solod), le sol devient d'aspect podzolique, neutre, pauvre en sels et en colloïdes organiques [105, 200, 207].

Des différences de niveau de quelques décimètres ont une grande influence [200] ; dans une même aire, les bas-fonds peuvent être occupés par des solontchaks, les plages un peu surélevées par des solonetz, et les parties hautes par des solods.

LA MICROFLORE

La flore microbienne des sols est un puissant facteur de leur fertilité.

Or, d'après Pantanelli [174], la nitrification est entravée en solutions titrant plus de 5 ‰ de sels.

La vitalité des microbes fixateurs d'azote est arrêtée par 1 ‰ de chlorure, 4 ‰ de nitrate et 20 ‰ de sulfate de soude.

Une forte concentration en sels peut donc s'opposer à la présence de micro-organismes dans le sol [49, 126,

185, 200]. Ravikovitch [185] a trouvé 1.890.000 bactéries par gramme de terre dans un sol ramené à 0,28 % de sels totaux et qui, salé auparavant à 1,03 %, renfermait seulement 15.200 bactéries par gramme.

Mais Verona [232] a trouvé 8.595.000 bactéries par gramme de terre à 0,5 % de NaCl contre 616.500 en terre à 0,01 %.

On a également constaté en U.R.S.S. que la flore microbienne est plus abondante dans les solontchaks et les solonetz qu'en sols non salins et en solods [105].

Selon Guermanoff, solontchaks et solonetz ont un pouvoir fixateur d'azote considérable ; l'ammonisation et la nitrification sont très actives en solontchaks, moins actives en solonetz, et faibles en solods.

En résumé, pour juger de l'action des sels sur la microflore, il faut certainement tenir compte de nombreux facteurs, notamment : humidité, aération des sols, concentration des sels, équilibres et antagonismes ioniques, pH, présence ou absence de matières organiques.

D'après Killian, c'est surtout le déficit d'air qui déprime l'activité microbienne [126].

LA SOLUTION DU SOL ET LA VÉGÉTATION

L'expression « teneur en sels du sol » n'a de sens précis que si l'on connaît très nettement le taux d'humidité de ce sol, et aussi sa teneur en CO_2 , à cause des réactions d'échange [97].

C'est la concentration de la solution du sol qu'il faut considérer, car, en des sols de même teneur en sels et d'inégale humidité, la concentration de la solution est inversement proportionnelle à leur taux d'humidité [95, 100, 241].

Les plantes cultivées se flétrissent généralement lorsque la pression osmotique de la solution et la force de succion du sol additionnées atteignent 15 atmosphères. La salinité, qui accroît la pression osmotique de ces solutions a, de ce fait, une influence considérable sur le point de flétrissement des plantes.

D'après Tames [222, 223], la plante meurt lorsque, dans la solution,

$$\Sigma m.e. = \frac{(At - Ch) Ps}{33,6}$$

$\Sigma m.e.$ = somme de milliéquivalents ;

At = eau totale du sol (capacité de rétention) = $Au + Ai$;

Au = eau utile du sol ;

Ai = eau inerte du sol, obtenue par l'addition de ses deux composants, Ch et Co ;

Ch = composant hygroscopique ;

Co = composant osmotique ;

Ps = force de succion des racines.

En Tunisie, il y a eu flétrissement des tomates à 14-15 % d'humidité en sol dont la solution contenait 7 grammes de NaCl par litre, et à 9 % dans le sol témoin sans sel [171].

En Irak, le flétrissement du maïs s'est manifesté à 7,5 % d'humidité dans un sol sans sel et, en sol salé, à 12 % [236].

L'état de la végétation suivant les sols dépend donc de la concentration de la solution et aussi de sa composition.

Les modifications brutales de cette concentration, sa diminution brusque au moment d'une irrigation exigent de la plante une adaptation rapide, sinon la plante souffre et meurt [171].

Mais beaucoup de plantes poussant en terres salées ne manifestent pas clairement les symptômes de flétrissement, leur turgescence se trouvant maintenue par leur forte pression osmotique et la réduction de l'évaporation, de sorte qu'elles peuvent souffrir gravement du manque d'eau avant que le fermier s'en aperçoive [200].

L'expérience de Barbier et Chaminade a montré que la quantité totale et la concentration globale des sels dissous dans la solution dépendent peu du pouvoir absorbant du sol mais que, par le jeu des échanges de cations, le complexe colloïdal modifie la composition de la solution [19].

L'équilibre entre les cations de la solution et le complexe est représenté par la formule de Gapon [97].

LES PRINCIPAUX SYMPTÔMES DE LA SALINITÉ

Selon Del Villar [110], les véritables halophytes sont en général prostrés, « succulents » et glabres; leurs feuilles sont petites (ou absentes) et cireuses, souvent à structure isolatérale, avec de rares méats.

Chez les plantes moins bien adaptées au milieu salé, les symptômes généraux d'une haute teneur en sels du sol (et de la plante elle-même) sont, d'après Russell [200], nanisation et rabougrissement, feuilles ternes, souvent bleuâtres et cireuses, puis dépérissement des bords du limbe [67], défoliation et mort.

Les réactions des plantes sont fortement influencées par les conditions climatiques du moment : température, humidité de l'atmosphère et du sol, qui agissent à la fois sur la plante elle-même et sur la concentration saline de la solution du sol.

Au surplus, chaque espèce présente des symptômes particuliers [209, 210, 241] que le cadre limité de ce rapport ne permet pas d'exposer. Mais les symptômes visibles ne constituent pas en eux-mêmes des problèmes; ils ne sont que les manifestations apparentes de la solution apportée par chaque végétal à l'ensemble des problèmes que pose son existence en milieu salé, et ils traduisent à la fois le déséquilibre dont il souffre et l'état d'équilibre qui s'établit entre la plante et le milieu.

Les cas de toxicité spécifique des divers sels étant bien rares, le problème essentiel est la réalisation à tout instant du meilleur équilibre possible, ou tout au moins d'un équilibre satisfaisant, entre l'eau, la plante et les sels dans le milieu considéré.

LA VÉGÉTATION NATURELLE (SPÉCIFICITÉ DES HALOPHYTES)

Les véritables halophytes sont, d'après Iljin [107], les plantes dont le protoplasme résiste à des accumulations de sodium relativement importantes dans leur suc cellulaire.

Elles ont, en général, une grande extension géographique et les botanistes considèrent la flore de toutes les terres salées comme appartenant à une même région naturelle, d'ailleurs peu variée [78]. Les halophytes sahariens, par exemple, sont, d'après Killian, des espèces littorales ou étroitement apparentées à celles-ci [130].

Les halophytes, plantes aux tissus gorgés d'eau, à forte pression osmotique et transpiration réduite [2, 119, 204], dont la succulencé est due, d'après van Eyk [75], à la présence des ions Cl^- , sont capables d'une forte assimilation chlorophyllienne en dépit de la présence des sels dans leurs tissus [2]; leur teneur en sels et leur pression osmotique augmentent avec celles des solutions du sol. En outre, l'intensité de respiration nécessaire pour l'absorption d'une quantité donnée de sels, et spécialement d'anions, serait beaucoup moins forte chez les halophytes que chez les autres plantes [2, 75].

Les principales associations végétales des sols salins sont faites surtout de salsolacées [28, 33, 34, 40, 71, 72, 79, 110, 154, 194, 203, 226], des genres *Arthrocnemum*, *Salicornia*, *Suaeda*, *Atriplex*, auxquelles s'ajoutent des juncacées et des composées (*Aster tripolium*) et d'autres espèces dites halophiles et qui, sans être de véritables halophytes, supportent plus ou moins la salinité. Ce sont notamment des graminées [194] : *Spartina*, *Glyceria*, *Atriplex*, *Cynodon dactylon* [178] et des légumineuses [2, 201].

Bien que les associations végétales soient différentes suivant les diverses régions du globe [226], pourtant, aussi bien dans les régions arides qu'au bord de la mer, la végétation s'ordonne en bandes parallèles ou concentriques d'après le degré d'humidité et la teneur en sels des sols [1, 33, 79, 151, 154, 155, 226, 229], ce qui donne une image frappante de la spécificité des végétaux à l'égard des conditions particulières de salinité, humidité et aération du milieu [1, 2, 33, 34, 226, 229].

La documentation concernant la végétation particulière aux solonetz est rare, probablement parce que beaucoup de sols salins sont plus ou moins solonetzifiés, de sorte que la végétation qu'on y trouve est à la fois halophile et plus ou moins alcalinophile [229]. Toutefois, Reynaud-Beauverie dit que *Statice Gmelini*, *Achillea crustata* et *Aster trifolium* dominent dans les sols à alcali noir [194].

En Hongrie, *Camphorosma ovata* serait l'espèce la plus résistante à l'action de CO_3Na_2 [120]. Enfin Joffe a donné, d'après Vilenski, des listes d'espèces poussant dans les divers solontchaks et solonetz. On y

trouve notamment pour les véritables solonetz : *Festuca saluta* var. *glauca*, *Gilias Besseri*, *Artemisia maritima*, *Statice Gmelini*, etc., si le solonetz s'est formé sur tchernoziom, *Artemisia pauciflora*, *Camphorosma monospermiacum*, *Kochia prostrata*, etc., s'il s'est formé en steppe aride [224].

LES PLANTES CULTIVÉES

OBSERVATION

Simonneau a fait récemment en Algérie [212, 213] une intéressante tentative d'établissement de correspondance entre les halophytes naturels et diverses plantes cultivées (voir annexe II).

Cette méthode permet de situer avec le maximum de précision certaines espèces cultivées dans l'échelle des tolérances au sel mais, faute de connaître avec précision les correspondances entre les taux de salure du milieu et la présence des divers halophytes naturels eux-mêmes, on ne peut évidemment pas en tirer avec précision cette même correspondance en ce qui concerne les espèces cultivées. Mais, la phytosociologie des halophytes et halophiles permet de prévoir la vocation agricole des terres, notamment la création de pâturages et l'extension des oasis [148].

Une autre méthode fréquemment employée [151, 152] consiste à observer les plantes cultivées sur sol salin et à doser la salinité de ce sol.

Les dosages ont en général l'inconvénient de se rapporter à la salure du sol et non à celle de sa solution, de sorte que, pour une même espèce cultivée, ils sont souvent différents, et il est difficile d'en tirer des conclusions généralisables. Ils fournissent cependant, par leur nombre, des indications qui permettent une certaine approximation dans l'établissement des échelles de résistance des espèces à la salinité du milieu.

EXPÉRIMENTATION

En raison de l'imprécision de la méthode précédente, on a cherché [67, 171, 174, 179, 239, 242] à lui substituer la méthode expérimentale qui consiste à cultiver les diverses espèces soit en des solutions aqueuses salines de compositions connues, soit en des sols artificiellement salés à des taux précis.

Mais la sensibilité d'une espèce donnée n'est pas la même quand la culture est faite en solutions aqueuses et quand elle est faite dans un sol; cette différence de comportement n'a pas encore, à notre connaissance, reçu d'explication, et elle tient peut-être, à notre avis, à l'aération des sols.

Même dans le second cas, les résultats ne sont valables que pour le sol et les conditions écologiques de l'expérience.

Il n'est pas facile non plus de choisir les critères convenables [241]; le degré de tolérance au sel peut en effet être apprécié en fonction : a) du taux auquel apparaissent les symptômes de souffrance; b) des baisses de rendement suivant les taux de salure du milieu; c) du taux mortel.

GERMINATION

Les sels agissent sur la faculté et sur l'énergie germinatives, mais les espèces ne réagissent pas toutes avec la même intensité [244].

Dupont [69] a obtenu en solution à 20,4 g de NaCl par litre les pourcentages suivants de germination : blé, 80; sarrasin, 35; vesce, 27; moutarde et lin, 19.

En solutions salines diverses, la germination de *Lepidium sativum* est arrêtée, quel que soit le sel employé (chlorures, nitrates, sulfates de Na, K, NH₄) quand la concentration est voisine de 0,4 molécule-gramme [146].

Les essais de Novikoff [171] avec les chlorures de Na, Ca et Mg ont également montré qu'il y avait peu de différences dans les germinations de diverses plantes potagères faites en solutions séparées de chacun d'eux; dès que la concentration est supérieure à 10 ‰ d'un quelconque de ces chlorures, toutes les germinations manifestent un retard de quatre à dix jours par rapport au témoin sans chlorure.

D'après Zijlstra [244] et Eperjessi [73], le retard de la germination est proportionnel à la concentration.

Selon Vasseur [231], les essences forestières germent sans difficultés en solution du sol titrant au plus 0,50 g de chlorures par litre.

Plusieurs expérimentateurs ont voulu établir l'échelle des limites supérieures tolérables pour les germinations [67, 171, 231, 243], notamment Passerini et Galli [179] (voir annexe III).

ÉVOLUTION DES PLANTES EN CROISSANCE

D'après Guérillot, le taux de chlore dans les plantes (céréales et légumineuses), par rapport à la matière sèche, subit pendant leur évolution une décroissance parfois précédée d'une augmentation avec passage par un maximum de sorte que le taux de chlore est toujours plus faible chez la plante âgée que chez la plante jeune [103, 104].

D'après Pantanelli, la résistance à la salinité augmente avec l'âge de la plante. Au passage de la phase végétative à la phase productive, la plante acquiert, et probablement tout à coup, un degré de résistance en sel bien supérieur [174].

La tolérance d'une plante à l'égard de la salinité peut donc être faible à l'état jeune, et forte quand la plante est « installée ». C'est le cas de la luzerne [174, 200], des maïs [227], des eucalyptus [212].

PLANTES ADULTES

On rappellera, avec Pantanelli [174], que les solutions d'un seul sel sont moins bien tolérées que les solutions complexes, avec lesquelles toutes les plantes végètent régulièrement jusqu'à 2,25 g de salinité totale par litre de solution.

De 2 à 5 ‰, les racines de nombreuses plantes se développent mal ou pas du tout, tandis que, chez d'autres, par exemple choux, raves, moutarde, tomates, aubergines, piments, riz, betteraves [56], coton, elles poussent encore bien. Au-dessus de 10 ‰, peu de plantes cultivées résistent, le chou cependant tolère jusqu'à 15 ‰ [174].

Dans le sol, ces limites s'élèvent, peu s'il est sablonneux, beaucoup s'il est argileux, peu s'il est pauvre en Ca, Fe, et Al libre, beaucoup s'il est riche en ces éléments. La matière organique augmente la tolérance si le sol est humide et la diminue s'il est sec [174].

Yankovitch a fait de belles expériences [239-243] en sols salés. Le graphique (annexe IV) emprunté à l'une de ses publications [241] montre le comportement particulier de chaque espèce et l'action stimulante du sel à faible dose sur certaines d'entre elles.

Novikoff a constaté que les concentrations de 9 à 10 g de sels par litre de solution du sol incommode les plantes maraîchères considérées comme résistantes à l'eau salée [171].

Il a également noté que les écarts brusques de concentration sont préjudiciables. Or, entre deux irrigations, la concentration de la solution du sol augmente progressivement et diminue ensuite brutalement au moment de la seconde irrigation.

La plante peut alternativement souffrir d'un excès de sel, puis brusquement d'un excès d'absorption d'eau de nature à provoquer l'éclatement et la mort des cellules.

Yankovitch a constaté [242] que l'action des chlorures raccourcit le cycle végétatif des céréales, renforce leur couleur, diminue la taille et le poids des tiges.

Les résultats varient cependant suivant les variétés.

L'action nocive des chlorures est diminuée par un bon éclairage et une exposition chaude.

En solution du sol à 5 ‰ de NaCl, elle réduit l'absorption d'eau par rapport aux témoins d'environ 25 % pour les blés, sans que leur rendement en grain s'en trouve diminué. La transpiration diminue également plus ou moins chez les autres espèces expérimentées.

Trabut a fait remarquer que les blés des oasis, qui sont irrigués à l'eau saumâtre, ne sont jamais rouillés [227].

Cependant les halophytes ne sont pas indemnes de maladies cryptogamiques [2].

ÉCHELLE DES RÉSISTANCES SPÉCIFIQUES A LA SALINITÉ

La place fait ici défaut pour reproduire les échelles établies par divers auteurs : Vasseur [231], Novikoff

[169], Passerini et Galli [179], Trabut [227], Simonneau [212, 213], Bricchet, longuement cité par Rolet [196], Klintworth [132], Miège [164], Tkatchenko [224], mais, compte tenu de leurs indications et des observations complémentaires fournies par d'autres auteurs [43, 56, 62, 65, 67, 113, 143, 198, 200, 202], on peut, semble-t-il, effectuer un classement approximatif des espèces (voir annexe V).

La résistance de certaines plantes, comme la vigne, se révèle très variable suivant les porte-greffes. On trouve des différences variétales chez la canne à sucre [196], les luzernes [62, 164], les blés [141, 177, 241, 242].

Le riz, utilisé sur terrains salés pendant leur dessalement [93, 164] parce que cultivé en submersion qui dilue abondamment la solution du sol, donne des résultats déplorables s'il est cultivé sur un sol dont la solution conserve, malgré l'inondation, plus de 5 g d'extrait sec par litre [74].

LE SEL COMME ENGRAIS

On n'insistera pas ici sur cette question. Elle n'est signalée que pour confirmer que, dans une certaine mesure, le sel ne constitue pas un danger, mais un avantage. Son emploi comme engrais est pratiqué de longue date sur des cultures relativement halophiles comme la betterave et l'orge, en Europe occidentale, pays pluvieux où l'excès de sels est naturellement lessivé. De longues controverses [103, 104] ont eu lieu en France au XIX^e siècle à ce sujet; l'efficacité de cet engrais n'a pas toujours été reconnue [159, 179, 200, 233], bien qu'en pratique on ait souvent obtenu des rendements accrus [39, 56, 103, 113 164, 165, 166, 173, 179, 196, 200], soit que Na⁺ ait libéré ou complété K⁺ du sol en faveur de la plante [56, 165], soit que l'action favorable ait été produite par Cl⁻ plutôt que par Na⁺ [39].

QUALITÉ DES PRODUITS

Même si une plante peut pousser en sol assez salé, la qualité du produit récolté peut s'en trouver affectée. Ainsi les céréales peuvent produire beaucoup de matière verte en sols trop salés et n'y donner aucune récolte de grain; la betterave à sucre poussant en sol salin donne généralement une racine pauvre en sucre, lequel est difficile à raffiner; des fourrages peuvent contenir tant de sels qu'ils deviennent immangeables ou dangereux pour le bétail [200]. La qualité du raisin [186] et celle du vin [151] sont affectées défavorablement ainsi que celle du tabac et des jus de canne à sucre [196].

D'après van den Berg, la salure affecte la qualité du malt, des pois, des jus de betterave, et de la filasse du lin [27].

Mais elle peut aussi, à doses modérées de sels, améliorer la qualité des produits. C'est le cas de nombreuses plantes maraîchères [25, 171, 174, 178, 227].

TOLÉRANCE ET ADAPTATION

Pour qu'une plante puisse s'accommoder de la salinité, il faut qu'elle possède, avant tout, une force de succion racinaire suffisante pour lui permettre d'absorber assez d'eau (et assez vite) dans la solution du sol afin de maintenir son propre taux de transpiration et sa turgescence [56, 200].

Du fait que les sols salins sont très souvent plus ou moins solonchifés, la tolérance aux sels est souvent liée avec la tolérance à l'alcalinité (aptitude à vivre en sol pauvre en calcium et à pH élevé) et avec la capacité d'une résistance prolongée à l'asphyxie [200], surtout pendant les irrigations.

On a peu de données sur les degrés de tolérance à l'égard des divers types de salure et de l'alcalinité. D'après Pantanelli, l'ordre décroissant de tolérance est, pour les cations : Ca^{++} , Na^+ , K^+ , Mg^{++} , et pour les anions : sulfate, chlorure, nitrate, bicarbonate [170].

Selon Dona Dalle Rose [65], *Hedysarum coronarium*, *Melilotus sicula* et *Lilalica*, certaines essences ligneuses : sapin noir d'Autriche, charme noir, tamaris, orme, chêne, supportent une alcalinité assez élevée, tandis que la plupart des autres plantes en souffrent (chlorose). La variété Mentana de blé tendre serait relativement résistante à l'alcalinité [177].

Dans l'appréciation des tolérances spécifiques à l'égard de la salinité globale (voir annexe V), les taux limites n'ont pas été chiffrés parce que les indications données à ce sujet par les auteurs sont différentes, ce qui tient aux conditions différentes de milieu.

Pour donner quelque ordre de grandeur, on peut rappeler que, dans l'expérience de Novikoff, les limites de tolérance (résidu sec par litre de solution du sol, dont la moitié en chlorures) ont été de 3 g pour les plantes sensibles, 5 g pour les plantes assez sensibles, 7 à 8 g pour les résistantes, 9 à 10 g pour les très résistantes [171]. Le palmier supporte des doses encore beaucoup plus élevées [43].

Mais, ajoute Novikoff, « ces limites n'ont rien d'absolu, et il est illusoire de vouloir caractériser par un chiffre l'aptitude d'une plante dans des milieux aussi compliqués et instables que les solutions du sol » [171].

En réalité, la notion de tolérance des plantes à l'égard des sels est extrêmement complexe, et de ce fait, confuse, parce que les facteurs qui interviennent sont extrêmement nombreux et leur action particulière mal discernée.

Toutefois l'indéniable spécificité de cette tolérance et la constatation de différences variétales conduisent à la notion d'adaptation possible des plantes.

Rares sont les halophytes véritablement utiles, à l'exception de certaines espèces fourragères (*Atriplex* par exemple). On utilisait autrefois les soudes (*Salsola*) pour la production de soude [30]. Auguste Chevalier signale les « Nitraria », halophytes arbustifs qui pourraient être sélectionnés, et dont le fruit est comestible [42]. En Hongrie, on a pu obtenir des fourrages sur terrains alcalins avec *Atropis limosa* [219].

La sélection des formes cultivables chez les halophytes, la recherche de variétés et d'écotypes halophiles chez les autres plantes [4, 73, 141, 177] méritent de retenir l'attention des généticiens et sélectionneurs.

Des expériences effectuées en Hongrie [73] ont montré que les blés originaires des terrains salés présentent une résistance plus grande à l'action nuisible du chlorure de sodium sur la germination que ceux des terrains acides.

Molliard [165] a fait remarquer que les plantes cultivées qui contiennent et supportent des quantités relativement importantes de Cl^- et Na^+ — les betteraves par exemple — sont d'origine maritime.

Mais la tolérance au sel suppose, dans l'esprit des généticiens « formels », une aptitude naturelle du « génotype » acquise par exemple par mutation ou hybridation, et suivie de sélection naturelle (ou dirigée) plutôt qu'une adaptation progressive au cours de générations successives sous l'effet du milieu.

Cependant, Maljcev, de l'école de Lyssenko, a fait savoir en 1941 que des plantules de blé, après traitement par une solution de chlorure de sodium, avaient donné naissance à des lignées tolérant les sols salins [109].

L'UTILISATION DES EAUX SALÉES ET SAUMÂTRES POUR L'IRRIGATION

ORIGINE ET NATURE DES EAUX

Les eaux salées ou saumâtres proviennent, soit de la mer, soit de la terre (sources, rivières, nappes phréatiques et artésiennes).

La pluie, surtout à proximité de la mer, contient de faibles traces de sels, surtout NaCl [47, 200, 216, 217]; elle ne peut, en raison de sa dilution, être considérée comme un facteur de salinisation des sols [194], mais elle peut contribuer à leur alcalinisation et à leur solodisation [47].

Utilisation des eaux salines

L'eau de mer renferme en moyenne 35 g de sels par litre, avec forte prédominance en NaCl; toutefois sa concentration globale varie, suivant les mers, de 33 à 39 dans les grands océans et la Méditerranée, à 6,30 dans la Caspienne [80].

Les eaux telluriques sont plus ou moins chargées de sels mélangés en proportions diverses [63, 83].

Frey en a proposé une représentation graphique, basée sur la valeur de réaction de chaque sel dissous, et qui permet de classer les eaux suivant leur faciès [80]:

Chloruré : eaux contenant surtout des chlorures.

Terreux : eaux calco-magnésiennes, bicarbonatées ou sulfatées.

Alcalin : eaux sodiques, bicarbonatées et sulfatées.

Parfois très salines [88, 185], les eaux phréatiques et artésiennes de la zone méditerranéenne contiennent habituellement 1 à 8 ‰ de résidu sec [83, 171, 174]. Elles sont généralement chlorurées sodiques [79, 146], encore que les autres ions y soient bien représentés (à l'exception des carbonates et bicarbonates), notamment à Ghadamès et dans le Sud tunisien où les eaux sont plutôt sulfatées calco-magnésiennes [13, 83].

La concentration des eaux (nappes et rivières) subit d'ailleurs des fluctuations saisonnières avec maximum en fin de saison sèche et chaude [36, 81, 82, 88, 151, 174].

LEURS EFFETS SUR LA VÉGÉTATION ET SUR LE SOL

L'eau d'irrigation agit sur les plantes par les modifications que son apport fait subir au sol et à sa solution.

L'ordre de classement des espèces en ce qui concerne la tolérance à l'égard de la salinité de l'eau d'irrigation est donc le même [171, 196] que pour la salinité de la solution du sol.

En Suède, l'arrosage avec l'eau de la mer Baltique (0,64 ‰ de salinité totale) a réduit de 50 % le rendement des haricots rouges, favorise la végétation des lupins et doliques [167], diminue la faculté germinative des pins d'Écosse [208].

Dans les expériences de Novikoff en Tunisie [171], les divers taux de salure de la solution du sol étaient obtenus par des arrosages avec des eaux salées (NaCl) ou saumâtres.

En Italie on a obtenu d'excellents résultats sur tomates, concombres, melons, carottes, etc., avec de l'eau à 5,13 g de résidu sec par litre, de moins bons sur pommes de terre et haricots [25]. Avec une eau saumâtre à 7,319 g, plus ou moins diluée, Bordigo et Ulpiani obtinrent pour la tomate les meilleurs résultats avec l'eau non diluée, pour le maïs avec l'eau la moins saline [174].

A Bari [174], la substitution d'une eau à 0,230 g de résidu sec par litre à une eau à 3 g abaissa d'environ 30 % les récoltes de tomates, qui furent aussi de moins

bonne qualité. On obtint des résultats analogues avec : aubergine, piment, fenouil, chou, rave, asperge, artichaut.

Pantanelli signale que *Hedysarum coronarium* et *Onobrychis sativa* résistent à l'alcalinité de l'eau d'irrigation [174].

Mais l'irrigation irrationnellement conduite avec les eaux salées détériore et stérilise les terres en provoquant leur salinisation, puis leur solonetzification progressive [94, 106, 182, 185].

Même une eau peu saline peut, à la longue, saler les sols pauvres en calcium, puis agir sur leurs propriétés physiques [36, 68, 82].

Par contre, d'autres sols supportent des apports de sels nettement plus élevés [47, 193].

Le problème de l'utilisation des eaux saumâtres pour l'irrigation est agropédologique plutôt qu'immédiatement biologique, car les végétaux supportent des degrés de salure supérieurs à ceux qui entraînent la dégradation du sol au bout d'un certain temps [182].

EAUX UTILISABLES

Le taux limite de salinité au-dessus duquel une eau cesse d'être utilisable pour l'irrigation atteint, suivant les auteurs [7, 41, 76, 134, 168, 174, 179, 182, 195], 0,6 à 3 ‰ de résidu sec, parfois davantage pour certaines espèces, à condition de prendre des précautions au-dessus de 0,5 ‰ [132, 139].

L'annexe VI donne l'échelle conventionnelle adoptée par le Laboratoire officiel de chimie agricole et industrielle de Casablanca [7].

Pour Chevalier [44] en Algérie, la salinité d'une eau n'excédant pas 5 g par litre ne constitue pas un empêchement absolu à l'utilisation de cette eau. En Tunisie, de nombreux jardins potagers sont irrigués avec des eaux contenant 2 g de NaCl par litre [171]. Dans le Sud tunisien ainsi qu'en Irak, on irrigue depuis des siècles avec de l'eau à 5 g d'extrait sec par litre [62, 171, 174].

En Tripolitaine, où les terrains sont en général très perméables, on peut, selon Della Gata, utiliser des eaux relativement concentrées contenant jusqu'à 10 ‰ d'extrait sec [83, 84].

On cultive avec succès dans les oasis sahariennes, aux eaux saumâtres et au sol généralement riche en gypse, nombre d'espèces potagères, même considérées comme plus ou moins sensibles au sel (melons, salades, aubergines, fèves, lentilles, etc.) [227].

Le maximum permis de teneur de l'eau en sels dépend du sol et du sous-sol. Plus ceux-ci sont perméables et riches en matières organiques et en gypse, plus la tolérance des végétaux est accrue [227].

C'est donc une sécurité d'utiliser les eaux les plus saumâtres sur les sols perméables [44] bien pourvus de CO_2 et où la surface de la nappe est profonde, car l'excès de sels peut être aisément entraîné vers le sous-sol [200]. D'autre part, en sols lourds, il faut de

l'eau relativement pure ou très pauvre en ions Na^+ et Cl^- parce que presque tous les sels restent dans la zone des racines et, si l'on irrigue avec de l'eau riche en ions Na^+ et Cl^- , le sol devient inapte à la croissance des plantes [200].

Le taux critique de Na^+ à ne pas dépasser dans le total des cations de l'eau est de 50 % [45] si le sol n'est pas gypseux [222]; on ne peut dépasser 67 % sans apporter les correctifs nécessaires [132, 133].

Plus le rapport Na/Ca est élevé dans une eau, et moins l'utilisation de celle-ci est désirable, mais si $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} > 2 \text{Na}^+$, il n'y a en général pas d'effets fâcheux de solonetzification [133, 200]. Un rapport Ca/Mg faible peut avoir les mêmes inconvénients que s'il s'agissait du rapport Ca/Na . Un rapport Na/Ca élevé est plus tolérable dans une eau d'irrigation à faible salinité que dans une autre à forte salinité (voir plus loin formule de Gapon).

Les eaux alcalines (carbonatées sodiques) sont en principe à rejeter et ne doivent surtout pas être employées sans l'accompagnement d'un correctif [132].

Toute eau boratée est toxique à partir de 0,1 ‰ de bore, absolument inutilisable à 2 ‰ [200].

On rappellera enfin que, du fait de l'évaporation et de la percolation, les eaux de drainage sont toujours beaucoup plus concentrées que l'eau d'irrigation et plus riches que celle-ci en Na et Cl , plus pauvres en Ca et SO_2 [200]. Il faut tenir compte de ces faits à propos des échanges qui s'effectuent dans le sol et aussi quand on envisage le remploi des eaux de drainage pour de nouvelles irrigations.

La possibilité et les modalités d'utilisation d'une eau saumâtre doivent être étudiées, dans chaque cas, en s'efforçant de tenir compte de tous les facteurs en cause et en conservant les marges de sécurité nécessaires. Ces études sont toujours difficiles.

Enfin, au cas où l'eau apparaît trop salée pour être utilisable aux fins désirées et où néanmoins son emploi serait indispensable faute d'autres disponibilités hydriques, il ne resterait qu'à envisager la correction de ces eaux avant leur utilisation.

Le Central National Council for Applied Research in the Netherlands a mis cette question à l'étude et envisage trois procédés, deux par élimination des électrolytes avec membranes soit non sélectives soit sélectives, le troisième par échange d'ions [10]. La substitution d'ions nutritifs aux ions nocifs dans un échangeur a été aussi préconisée par Austerweil [17].

CONDITIONS ET MODALITÉS DE LEUR EMPLOI [12, 65, 174, 175, 176]

L'utilisation des eaux salines pour l'irrigation cumule les difficultés de l'irrigation en général et celles de l'utilisation des terres salines [97], en y ajoutant les

inconvénients du maintien de la salure dans ces terres à cause des apports salins de l'eau [151].

En effet, l'irrigation à l'eau saline peut provoquer une importante accumulation de sels [14] dans le sol si la percolation est insuffisante.

Il faut donc, sans perdre de vue les règles générales de l'irrigation qui commandent de ne pas gaspiller l'eau, apporter un excès d'eau pour éliminer les sels par lessivage [132, 200, 222]. Il faut aussi prendre des mesures pour éviter la solonetzification de la terre. Les espèces à cultiver doivent être choisies parmi celles qui pourront supporter la salinité de la solution du sol, sans réduction dommageable des rendements et de la qualité des produits. Elles doivent aussi supporter l'excès d'eau et le manque d'air pendant les irrigations et être placées dans un milieu aussi propice que possible. Pour répondre à ces diverses préoccupations, il faut [97, 151, 153, 155] :

Lessiver par des irrigations abondantes les sels en excès, notamment avant les semis ;

Éviter, par des irrigations fréquentes, la pénurie d'eau disponible pour les plantes, ainsi que les variations excessives et brutales de la concentration de la solution du sol ;

Freiner l'évaporation qui facilite la remontée et la condensation des sels dans la zone des racines et en surface du sol ;

Maintenir ou ramener la nappe phréatique à une profondeur suffisante pour éviter la remontée générale de l'eau et des sels surtout si la nappe est elle-même saumâtre [85, 88, 200] ;

Éviter les dénivellations du sol qui provoquent des concentrations et dépôts de sels dans les horizons supérieurs ;

Maintenir par des amendements convenables la proportion d'ions Na^+ suffisamment basse, et obligatoirement au-dessous de 12 % du total des cations échangeables du complexe absorbant du sol afin d'éviter l'imperméabilisation et la solonetzification du sol ;

Maintenir ou créer dans le sol, par l'apport de fumures convenables, une solution nutritive satisfaisante et bien équilibrée ;

Assurer la percolation, le drainage rapide pour éviter l'asphyxie [200], l'évacuation des eaux excédentaires [94, 132, 171, 189] et, s'il y a lieu, par un système de drainage profond, l'abaissement vertical ainsi que l'écoulement latéral de la nappe [88, 188, 200].

Il ne faut pas irriguer à l'eau saumâtre si le niveau supérieur de la nappe phréatique ne se trouve pas au moins à 1,50 m de la surface du sol en terre légère, 2 m en terre argileuse. Ces chiffres sont même, dans la pratique russe, respectivement fixés à 3 et 5 m [100, 199].

La quantité d'eau nécessaire pour le lessivage est fonction du taux de salinité qu'on ne veut pas dépasser dans la solution du sol, de la salure de l'eau et des quantités d'eau requises par l'évaporation et la trans-

piration [132]. Elle s'accroît considérablement quand on veut obtenir un dessalement du sol plus accusé (voir annexe VII). D'où l'intérêt de cultiver des espèces tolérantes qui n'exigent point un tel dessalement [132] et d'employer des eaux dont le degré de minéralisation ne soit point trop élevé [189].

L'élimination des sels peut être facilitée par :

Les pluies [171] et les irrigations d'hiver [181]. On estime que des pluies annuelles de 400 à 500 mm lessivent complètement l'excès de sels [222];

L'adoption de rotations culturales faisant alterner en périodes opportunes les cultures irriguées (l'été), ou non (l'hiver), et comportant parfois la mise en jachère;

La suppression dans les cas extrêmes de salure excessive du sol, et de l'eau, de toute irrigation, donc de toute culture pendant la saison sèche et chaude au cours de laquelle l'évaporation est intense et l'eau généralement plus salée, et parfois moins abondante;

Des travaux judicieux du sol.

Les scarifiages profonds (sous-solages) peuvent faciliter le drainage [86]. Les labours profonds peuvent être heureux si le sous-sol est sulfaté calcique, défavorables s'il est chloruré, et doivent être proscrits dans les terres récemment émergées où le plan d'eau salée est très proche de la surface [58, 59, 86].

On réduit l'évaporation par binage, paillage [93, 94], couverture du sol par des roseaux [166], du papier [164] ou une pellicule de bitume [118].

Les fumures organiques : fumier, tourteaux, engrais verts (par exemple fenugrec ou sulla qui supportent la salure), enrichissent le sol et améliorent son état physique [56, 164].

Les engrais minéraux maintiennent la fertilité du sol appauvri par le lessivage et par les récoltes; K et P s'opposent à l'absorption de Na [171, 191, 192].

Si le sol contient peu de calcium et beaucoup de Na échangeable ou de CO_3Na_2 , il faut éviter son imperméabilisation au moment des lessivages par l'eau de pluie; il peut être plus avantageux, dans certains cas, d'assurer le lessivage avec de l'eau relativement salée [200].

L'emploi des amendements calciques provoque la substitution ionique de Na^+ par Ca^{++} et permet de prévenir ou corriger la solonetzification du sol [23, 36, 49, 70, 132, 188, 197, 200, 221, 222].

Les chiffres donnés par les auteurs pour l'emploi des amendements sont d'ailleurs très variables [35, 49, 58, 59, 93, 132, 164, 200].

La chaux se carbonate et devient rapidement insoluble, surtout en sol mal aéré pauvre en CO_2 , mais on peut, suivant les sols, employer 3 à 20 quintaux de CaCl_2 à l'hectare ou 2 à 30 tonnes de gypse broyé [49, 58, 59, 65]. En outre, en solonetz, la chaux accroît la basicité du sol [199].

CO_3Ca n'est utilisable que si le pH du sol n'est pas trop élevé [200].

On peut aussi apporter du soufre [65] qui oxyde en SO_4H_2 , abaisse le pH du sol, souvent trop élevé en

régions arides, mais son action est lente [164] ou faible [188]. L'acidification du sol peut aussi être favorisée par l'apport de fumier qui libère CO_2 , et d'engrais acides (superphosphates) ou acidifiants (sulfate d'ammoniaque). L'ammonium est, selon Dalle Rose, « le plus redoutable adversaire » du sodium [65].

On préconise aussi parfois l'emploi de sulfates de fer ou d'aluminium, et de l'alun parce qu'ils solubilisent le calcium [164, 174].

Si le sol peut être maintenu en bon état physique, son lessivage ne constitue pas un problème difficile à résoudre [36, 98, 185] à condition d'adopter une méthode convenable d'irrigation répartissant uniformément l'eau et les sels [97]. Le nivellement doit être parfait [97, 100].

L'irrigation par rigoles provoque une forte accumulation de sels en surface [132, 184] et affecte sévèrement la végétation et les récoltes [184].

Par submersion et déversement (*flooding*), la concentration des sels reste beaucoup plus faible et les plantes sont normales.

Il faut éviter d'irriguer de la même façon les différentes parties d'un champ hétérogène. On doit aménager les parcelles de façon à irriguer séparément les sols de différentes natures [132].

Klintworth recommande la méthode des cuvettes (bassins) et dit que l'irrigation par rigoles ne peut être employée que si l'eau n'est pas trop saumâtre et si le sol peut être ensuite lessivé par l'emploi de la méthode des calants [132].

L'irrigation par aspersion est déconseillée parce que, généralement pratiquée avec trop peu d'eau, elle ne permet pas le lessivage des sels [100].

En résumé, il importe de ne jamais disjoindre les deux questions : élimination des sels en excès et préservation du sol contre la solonetzification, tout en fournissant aux plantes l'eau dont elles ont besoin, maintenue au taux de salure qu'elles peuvent supporter.

Il faut donc s'efforcer de prévoir à l'avance les conséquences possibles des irrigations. Kostiaikov [139] recommande à ce sujet l'emploi de formules qui, tenant compte des facteurs écologiques, permettent de calculer les quantités d'eau à utiliser.

BILAN DE L'EAU ET DES SELS

Kovda [137] établit le bilan des sels d'après la formule :

$$S = \text{SO} + (\text{Sw} - \text{sw}) + \text{Siw} - \text{SR}$$

dans laquelle :

S = modification de la réserve globale des sels solubles dans le sol;

SO = richesse initiale du sol en sels solubles (avant irrigation);

Sw = enrichissement du sol en sels solubles par suite de la remontée des sels;

sw = appauvrissement du sol sous l'effet du lessivage;
 Siw = apport de sels par l'eau d'irrigation;
 SR = sels enlevés par les récoltes.

D'après Tkatchenko, cette formule n'est pas toujours facile à utiliser parce que plusieurs de ses données sont difficiles à connaître, par exemple Sw [137].

La formule de Bryssine et Chérotzky [38]

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

permet de prévoir la marche des opérations de salage ou dessalage et de déterminer le volume et la fréquence des arrosages, à condition qu'il n'y ait pas de remontées de sels.

Dans cette formule Y et S sont exprimés en grammes, Q et R en litres, par kilo de terre sèche.

Y = quantité de sels se trouvant dans le sol après x arrosages;

S = teneur en sels avant le premier arrosage;

Q = volume d'eau apporté au sol par chaque arrosage;

R = volume d'eau retenu dans le sol immédiatement après chaque arrosage; ce volume est égal à la différence entre la capacité de rétention du sol et son humidité avant l'arrosage;

x = nombre d'arrosages;

$K = \frac{CQ}{R - 1}$ est la quantité limite de sels apportés

par l'eau d'arrosage et que le sol peut retenir;

C = concentration des sels dans l'eau d'irrigation (en grammes par litre).

Partant de la formule de Lawhon

$$S_a = \frac{5 S_a}{P}$$

Tames donne la formule [222] :

$$I_s = \frac{1,68 \times 10^6 \times S_a}{(At - A_h K) \times P_s \times P \times E}$$

dans laquelle :

I_s = indice salinisateur de l'eau;

S_a = teneur en sels (‰) de l'eau;

S_a = teneur en sels (‰) du sol à la fin de l'irrigation;

E = nature des sels de l'eau;

At = eau totale du sol;

A_h = coefficient hygroscopique du sol; ce coefficient est déterminé au laboratoire suivant la méthode de Mistcherlich;

K = coefficient dépendant de la force de succion radriculaire et tel que $A_h \times K = Ch$ (composant hygroscopique du sol agissant sur la proportion d'eau du sol indisponible pour la plante);

P_s = force de succion des racines;

P = indice de perméabilité du sol.

Par cette formule il est possible, d'après son auteur, de prévoir si une eau produira ou non la salinisation du sol qui rendrait celui-ci impropre à la culture, et de résoudre d'autres problèmes relatifs à la productivité d'une plante déterminée cultivée en un sol aux caractéristiques connues et arrosé avec une eau de composition également connue [223].

Fedorow donne des formules pour calculer le taux de chlore du sol après chaque irrigation et son accumulation possible après un certain temps [76].

La formule de Gapon [97]

$$\frac{Na_x}{Ca_x + Mg_x} = K \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$$

dans laquelle le membre de gauche représente la composition des bases échangeables du sol, et celui de droite, celle de l'eau d'irrigation, exprime le rapport entre le sodium échangeable du sol et la solution. Les cations échangeables du sol sont exprimés en milliéquivalents-grammes par 100 g de sol, et les concentrations des cations de la solution le sont en milliéquivalents-grammes par litre. Le coefficient K dépend de la nature du sol et varie généralement entre 0,01 et 0,015 [97]. Cette formule permet de prévoir l'effet d'une eau salée sur l'absorption d'ions Na^+ par le complexe absorbant du sol, et par conséquent de contrôler la solonetzification du sol (voir annexe VIII).

En outre, d'après cette équation, le pourcentage d'ions Na^+ admissible dans l'eau d'irrigation varie en raison inverse de la concentration de l'eau en sels solubles [133].

LES PROBLÈMES CLIMATIQUES RÉGIONAUX

EAUX MARINES ET TERRES ÉMERGÉES

Dans ce cas, le vrai problème n'est pas d'utiliser l'eau salée, mais de s'en débarrasser.

PAYS ARIDES ET EAUX TELLURIQUES

En ces pays la chaleur et la sécheresse accroissent l'évapotranspiration, donc la concentration des solu-

tions du sol, tandis que la lumière et la chaleur augmentent la perméabilité cellulaire; la marge de sécurité vitale se trouve ainsi réduite pour les plantes, surtout en période sèche et chaude, du fait de la rareté de l'eau disponible et de sa teneur en sels. Les plantes se montrent donc en ces régions très sensibles aux influences climatiques (température et taux d'humidité de l'atmosphère et du sol) et à leurs variations. Il est, suivant les cas, utile ou indispensable d'irriguer les cultures, avec des eaux qui sont souvent saumâtres.

L'utilisation de ces eaux pose des problèmes permanents qui diffèrent quelque peu suivant les conditions climatiques des diverses régions.

La zone méditerranéenne [99] est caractérisée par la division de l'année en deux grandes périodes : l'une fraîche et pluvieuse, provoquant le lessivage des sels [36, 37, 100]; l'autre chaude et sèche, au cours de laquelle l'irrigation est indispensable aux cultures, mais peut contribuer au salage de la terre, soit par les apports de l'eau saumâtre utilisée, soit par la remontée des sels [36], et aboutir à des résultats désastreux si le drainage n'est pas assuré [171].

Les solonetz y sont naturellement rares, mais la solonetzification est à redouter du fait même de l'irrigation, notamment à cause des pluies d'hiver faisant suite aux arrosages d'été avec des eaux minéralisées, le plus souvent sodiques. Le lessivage est nécessaire, mais son effet dispersant doit être évité par l'emploi judicieux d'amendements convenables.

Les déserts du type saharo-indien [118] couvrent

de très importantes surfaces en Afrique ainsi qu'au Proche-Orient et au Moyen-Orient.

Les pluies y sont rares (mais parfois violentes). Elles ne tombent jamais en été (sauf parfois au sud du Sahara). L'atmosphère y est très sèche, l'évaporation très intense et la transpiration végétale accentuée. Plus encore qu'en zone méditerranéenne, il convient de prendre des mesures pour réduire l'évaporation.

A cause du déficit permanent d'humidité [177], l'irrigation y est indispensable toute l'année pour les cultures, qui se cantonnent dans les oasis. En raison de la rareté des pluies, de la richesse des eaux en sels, de la nature des terres souvent riches en sulfate de Ca [227], le danger le plus à craindre est l'excessif enrichissement du sol en sels, plutôt que sa solonetzification.

Il faut irriguer l'hiver pour lessiver les sels et, le cas échéant, suspendre cultures et irrigations pendant la période la plus chaude [171].

Il n'y a d'ailleurs pas de limite nette entre la zone méditerranéenne et les déserts.

Dans l'hémisphère sud, l'Afrique du Sud est assimilable à la zone méditerranéenne et le désert de Kalahari (Sud-Ouest africain) aux déserts saharo-indiens.

PAYS TEMPÉRÉS, TROPICAUX ET ÉQUATORIAUX

Les problèmes de la salinité ne se posent pas dans les pays tempérés d'Europe, et encore moins en Afrique équatoriale et tropicale, en raison de l'abondance et de la fréquence des pluies tout au long de l'année.

VUE D'ENSEMBLE ET CONCLUSIONS

En résumé, les plus importants travaux de base concernant l'alimentation minérale et le développement des végétaux semblent avoir été effectués en France, en Allemagne et en Angleterre, l'étude des halophytes avoir été principalement conduite en Europe méridionale ainsi qu'en Afrique du Nord, en A.-O.F., en U.R.S.S. et aux Pays-Bas, et l'étude des sols salins et de leur mise en valeur avoir été faite au Soudan anglo-égyptien ainsi qu'en U.R.S.S. et en Hongrie. On a d'autre part beaucoup étudié aux Pays-Bas et en Belgique les cultures sur sol antérieurement occupé par la mer et c'est dans le Bassin méditerranéen (Italie, Afrique française du Nord, Espagne, Israël et Tripolitaine) qu'on s'est préoccupé le plus de l'utilisation des eaux salées ou saumâtres pour l'irrigation.

Il ressort de tous ces travaux, ainsi que de la pratique même des irrigations, que l'emploi des eaux saumâtres ou salées n'est pas *a priori* nocif. Il constitue même un puissant facteur de bonification des pays arides [175],

car les sels suffisamment dilués, donc l'eau d'irrigation modérément saline, stimulent la végétation [155], favorisent la vie microbienne utile du sol [174], améliorent les rendements et la qualité des produits [25, 175].

En outre l'application d'eau saumâtre réduit l'évaporation du sol et la transpiration des plantes, augmente leur résistance à la sécheresse. Elle permet donc une économie d'eau [174] par la plante. Mais malheureusement, dans la pratique agricole, cette économie est largement compensée par l'apport supplémentaire d'eau indispensable au lessivage des sols.

Mais en sol dont la solution est excessivement saline ou déséquilibrée, les plantes risquent de souffrir et parfois de mourir d'intoxication (absorption excessive d'un ou plusieurs sels), mais plus souvent de soif (excès de pression osmotique de la solution extérieure et de succion du sol), de faim (en solonetz) ou d'asphyxie (excès d'eau de lavage en sol imperméabilisé).

En effet, lorsqu'on irrigue à l'eau saumâtre :

1. A l'exception parfois des sels de magnésium [29] la toxicité de chaque sel est rarement en cause de façon évidente et importante (effet toxique direct), grâce aux antagonismes ioniques.
2. C'est le taux de salinité globale qui joue le rôle de facteur limitatif pour la végétation. Son effet est à la fois direct (absorption de sels en excès) et indirect (par pénurie d'eau disponible).
3. Enfin, c'est la composition défectueuse de l'eau, donc de la solution du sol, qui provoque la solonetzification du sol avec ses fâcheuses conséquences sur la végétation (pH élevé, imperméabilisation du sol, insolubilisation des éléments nutritifs). Ces constatations posent des problèmes (voir annexe IX) qui concernent la plante, le sol, l'eau, le climat et leurs relations, problèmes qui s'enchevêtrent et sont bien difficiles à étudier séparément.

Des solutions leur ont déjà été données, soit empiriquement, soit après recherches et expérimentation.

Elles peuvent, très brièvement, se résumer ainsi :

1. Reconnaissance et choix des espèces et variétés résistantes à la salinité globale ;
2. Limitation d'emploi des eaux saumâtres à un taux de salure compatible avec la vie de ces espèces et variétés et avec la nature du sol ;
3. Choix des sols à irriguer avec ces eaux : sols perméables et bien drainés, riches en calcium et en hydrates de fer et d'aluminium [174] ;

4. Prévision et surveillance de la dynamique des sels et de l'évolution des sols sous l'effet de l'irrigation avec ces eaux, et maintien d'une dilution suffisante et du bon équilibre ionique de la solution du sol ;

5. Aménagement des sols et des irrigations en vue de fournir assez d'eau disponible à la plante et, en même temps, d'éviter le dépôt, la remontée et l'accumulation des sels ainsi que la solonetzification des sols (méthodes d'irrigation ; travaux du sol ; amendements et fumures).

En définitive, l'utilisation rationnelle des eaux saumâtres reste subordonnée, compte tenu du climat, à la maîtrise des réactions et échanges entre le sol, l'eau et la plante. Mais les rapports entre les sels, les eaux, les sols, les plantes constituent un ensemble de problèmes fort complexes dont les solutions sont encore partielles et incomplètes, ce qui justifie la poursuite et l'entreprise d'études, les unes générales, les autres propres à chaque cas particulier.

Pour terminer, il nous reste à remercier très vivement tous ceux de nos confrères et correspondants de tous pays qui ont bien voulu compléter, dans toute la mesure du possible, notre documentation. Mais nos regrets sont très vifs de n'avoir pu, dans un cadre beaucoup trop étroit pour traiter complètement une aussi vaste question, accorder toute la place qu'ils auraient méritée à la plupart des études et travaux qui nous ont été communiqués ou que nous connaissions déjà.

ANNEXE I

CLASSIFICATION DES SOLS SALINS ET ALCALINS (d'après DE SIMOND [207] ; tableau communiqué par G. AUBERT)

Sols	Teneur globale en sels ‰ de terre sèche	Caractéristique du complexe absorbant et pH des sols
Salins	> 1	$K^+ + Na^+ < 12\%$ des cations échangeables.
Salins à alcalis	> 1	$K^+ + Na^+ > 12\%$ des cations échangeables, avec pH = 7 à 8,5.
Légèrement salins, à alcalis	> 1	$K^+ + Na^+ > 12\%$ des cations échangeables, avec pH = 8,5 à 10.
Dégradés, à alcalis	< 1	Présence de H^+ échangeable, pH < 6 ou compris entre 6,5 et 8.
Améliorés, à alcalis	< 1	Présence de $Ca^{++} + Mg^{++}$ échangeables au lieu de H^+ .

ANNEXE II

TABLEAU DE CORRESPONDANCE ENTRE HALOPHYTES
ET PLANTES CULTIVÉES
(établi d'après les données de P. SIMONNEAU [213])

Association naturelle (par ordre décroissant de salinité du sol)	Facies de l'association	Proportion approximative de sel dans le sol (exprimée en NaCl ‰ de terre sèche)	Végétaux cultivés correspondants (et espèces commensales)
<i>Arthrocnemum macrostachyum</i> ; <i>Salicornia fruticosa</i> ; <i>Scirpus maritimus</i> ; <i>Juncus maritimus subulatus</i> .			Cultures impossibles sans lessivage préalable des horizons utilisés par les plantes.
<i>Salicornia fruticosa</i>	Pure	8	Extrême limite du cotonnier, petites colonies de <i>Hordeum maritimum</i> .
<i>Salicornia fruticosa</i>	<i>Suaeda fruticosa</i>	> 7	Limite de <i>Cynodon dactylon</i> et <i>Polygonum monspeliensis</i> .
<i>Suaeda fruticosa</i>	<i>Salicornia fruticosa</i> (rare)	6 à 8	Début de culture productive du cotonnier.
<i>Suaeda fruticosa</i>	<i>Salicornia fruticosa</i> (rare)	5 à 7	Bons résultats avec chou, betterave, méliot; nanisation et stérilisation du maïs.
<i>Suaeda fruticosa</i>	<i>Salicornia fruticosa</i> (rare)	4 à 5	Extrême limite de la culture des blé, orge, avoine.
<i>Suaeda fruticosa</i>	Pure	3,5	Bons résultats avec cotonnier, betterave, artichaut, grenadier, avoine, luzerne (adulte). Stérilité de l'olivier. Possibilité d'installation de <i>Festuca arundinacea</i> , après lessivage.
<i>Suaeda fruticosa</i>	Avec <i>Calendula algeriensis</i> et <i>Ormenis praecox</i>	2 à 3,5	Assez bonne végétation du maïs.
<i>Suaeda fruticosa</i>	<i>Atriplex halimus</i>	2 à 3	Culture possible des tomate, courgette, melon, pastèque, olivier. Résultats décevants avec le trèfle d'Alexandrie.
<i>Atriplex halimus</i>	<i>Suaeda fruticosa</i>		Évolution difficile du lin, bonne végétation de l'olivier.
<i>Atriplex halimus</i>	Pure	1 à 2	Limite de la culture des pomme de terre, carotte, oignon, piment, poivron. Végétation pénible des agrumes.

ANNEXE III

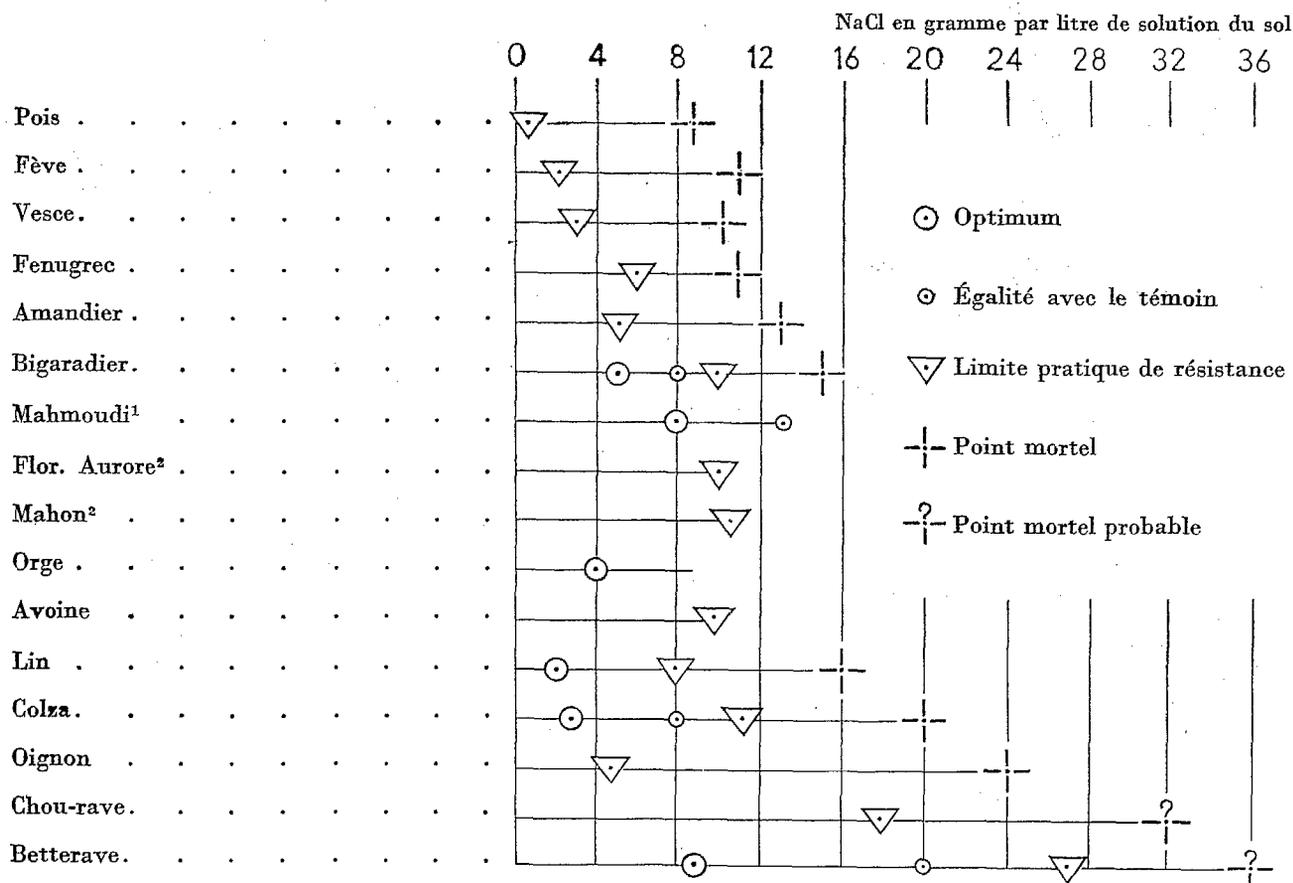
ÉCHELLE DES TAUX LIMITES DE RÉSISTANCE AU CHLORE DES PLANTES EN GERMINATION

‰ de Cl dans la solution extérieure (d'après Passerini et Galli [179])

- 1 : melon, lentille.
- 1,5 : ail, concombre, pin maritime, abricotier, citronnier.
- 2 : blé tendre, seigle, millet, sorgho sucré, carotte, oranger, pêcher, prunier.
- 3 : artichaut, piment, oignon, pomme de terre, orge, blé dur, riz, cotonnier, grenadier, amandier, jujubier, figuier, poirier, vigne.
- 4 : navet, chanvre, pois chiche, lupin blanc, sétaires d'Italie, tomate, trèfle des prés.
- 6 : chou, haricot, radis, fève.
- 8 : gesse, luzerne, maïs.
- 10 : palmier.
- 12 : *Ervum ervilia*.

ANNEXE IV

GRAPHIQUE EXTRAIT DE : L. YANKOVITCH,
« Résistance aux chlorures des plantes cultivées » [242], p. 73



1. Blé dur (*T. durum*).
2. Blé tendre (*T. vulgare*).

N.B. Pour l'auteur, la limite pratique de résistance est atteinte quand le rendement est égal à 80 % de celui du témoin sans NaCl.
La mort des végétaux se produit en général quand la teneur en NaCl de la matière sèche des feuilles est égale à 12 - 15 %.

ANNEXE V

SENSIBILITÉ SPÉCIFIQUE DES PLANTES CULTIVÉES A L'ÉGARD DE LA SALINITÉ DE LA SOLUTION DU SOL

1. *Plantes très sensibles* qui ne supportent pas du tout le sel : violette, néflier du Japon.
2. *Plantes sensibles* : haricot, lentille, fraisier, ramie, presque toutes fleurs et plantes d'ornement, noyer.
3. *Plantes assez sensibles* : laitue, pois, dolique, fève, féverole, vesces, haricot de Lima, soja, patate douce, tabac, lin, chanvre, pâturins, fétuque élevée, agrumes, poirier, cognassier, abricotier, prunier, amandier, groseillier, framboisier, vignes américaines.
4. *Plantes assez résistantes* : céréales, colza, tournesol, la plupart des plantes potagères, des graminées et légumineuses fourragères, vignes françaises, œillets, *Rosa Banksia*, divers peupliers et *Eucalyptus (globulus, robusta, occidentalis)*, *Myoporum*, olivier, figuier, pistachier, jujubier, *Casuarina equisetifolia*.
5. *Plantes résistantes* : artichaut, tomate, mélilots, luzernes, lotiers, scorpiure, trèfle, fraise, *Chloris gayana*, *Paspalum dilatatum*, *Sapindus utilis*.
6. *Plantes très résistantes* : asperge, betteraves, épinard, choux, cotonnier, fenugrec [244].
7. *Plantes extrêmement résistantes* : *Atriplex* divers (*halimus, semi-baccata*, etc), palmier dattier.

N.B. Ce classement est incomplet et approximatif, car les auteurs ne sont pas toujours du même avis pour certaines espèces par exemple l'aubergine, le céleri. En outre, le degré de sensibilité est variétal autant que spécifique (ex. : luzerne, céréales).

Pour la vigne c'est une question de cépage (porte-greffes et greffons). Comme pour la vigne, la nature du porte-greffe est à considérer chez les arbres fruitiers.

ANNEXE VI

EAUX D'IRRIGATION.

ÉCHELLE CONVENTIONNELLE ADOPTÉE PAR LE LABORATOIRE OFFICIEL DE CHIMIE AGRICOLE ET INDUSTRIELLE DE CASABLANCA (MAROC) [7]

(Taux de chlorures, exprimé en NaCl, en grammes par litre)

- < 0,5 eau propre à toutes irrigations.
- 0,5 - 1 eau propre à l'irrigation en général.
- 1 - 1,5 eau légèrement chlorurée pouvant servir à l'irrigation en général, à utiliser avec précaution pour les semis délicats.
- 1,5 - 2 eau chlorurée pouvant servir pour l'irrigation en général, sauf pour les semis délicats.
- 2 - 2,5 eau fortement chlorurée pouvant encore être utilisée avec précaution pour l'irrigation.
- 2,5 - 3 eau fortement chlorurée pouvant servir encore à certaines irrigations.
- 3 - 4 eau très fortement chlorurée pratiquement inutilisable pour l'irrigation.
- > 4 eau salée impropre aux irrigations.

ANNEXE VII

APPORTS NÉCESSAIRES D'EAU D'IRRIGATION

(D'après : H. KLINTWORTH, « The use of brack water for irrigation » [132])

A. Cas où la solution du sol ne doit pas dépasser un taux de sels supérieur à 1 %.

<i>Eau nécessaire (en pouces)</i>	<i>% de sels dans l'eau d'irrigation</i>					
	0,1	0,20	0,25	0,3	0,4	0,5
Eau nécessaire à la transpiration et à l'évaporation	24	24	24	24	24	24
Eau nécessaire au lessivage et au drainage	2,7	6	8	10,3	16	24
TOTAL d'eau nécessaire	26,7	30	32	34,3	40	48

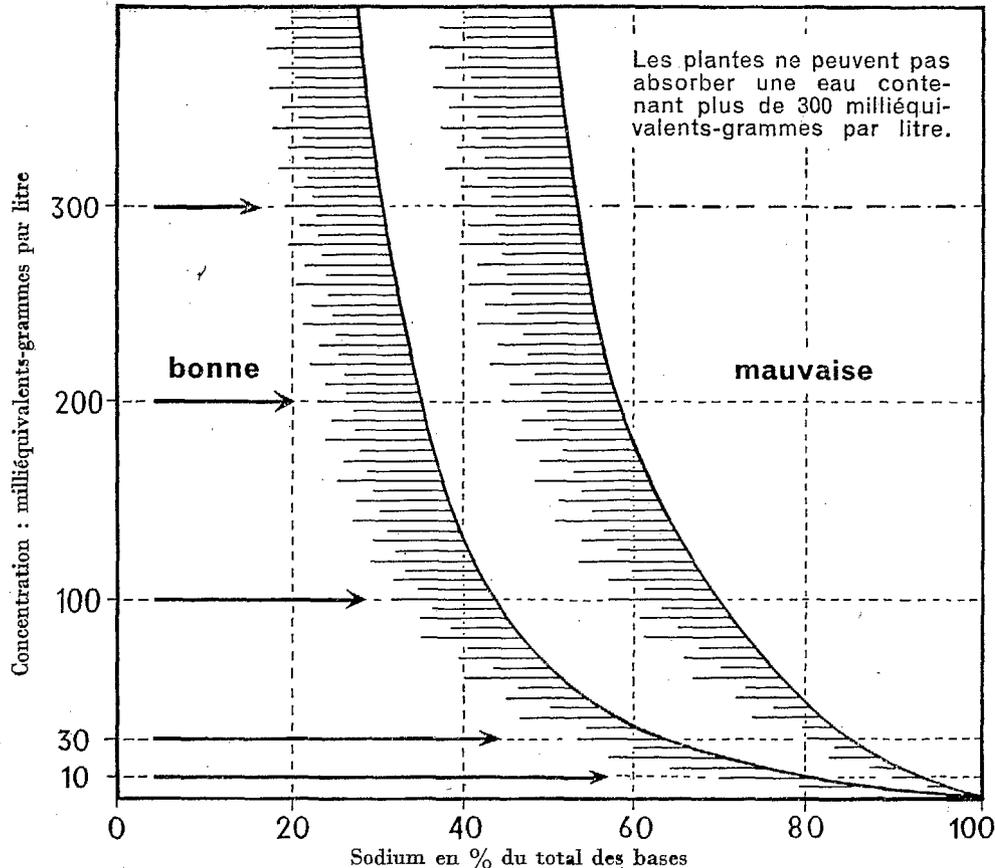
B. Cas où la solution du sol ne doit pas dépasser un taux de sels supérieur à 0,5 %.

Eau nécessaire (en pouces)	% de sels dans l'eau d'irrigation					
	0	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4
Eau nécessaire à la transpiration et à l'évaporation	24	24	24	24	24	24
Eau nécessaire au lessivage et au drainage	0	6	10,3	16	36	96
TOTAL d'eau nécessaire	24	30	34,3	40	60	120

ANNEXE VIII

QUALITÉ DE L'EAU D'IRRIGATION SUIVANT LA CONCENTRATION TOTALE EN SELS ET LA PROPORTION DE SODIUM

(Diagramme extrait de l'étude agricole de la F.A.O. n° 3 : *Utilisation des terres salines*, préparée sous la direction de H. Greene [97])



Qualité de l'eau d'irrigation suivant la concentration totale en sels et la proportion de sodium. L'eau contenant moins de 10 m. é. par litre convient généralement bien à l'irrigation. L'eau contenant plus de 30 m.é. par litre ne convient généralement pas. Après application, l'eau peut devenir plusieurs fois plus concentrée, et ses effets sur le sol dépendent alors largement de sa composition, une proportion élevée de sodium étant défavorable. Les flèches indiquent les concentrations initiales et finales possibles. Les courbes sont basées sur l'équation de E.N. Gapon (1933) et sur les observations de O.C. Magistad, M. Fireman et Betty Mabry (1944).

ANNEXE IX

TABLEAU GÉNÉRAL DES PROBLÈMES RELATIFS AUX PLANTES TOLÉRANT L'EAU SALÉE OU SAUMÂTRE ET A L'UTILISATION D'UNE TELLE EAU POUR L'IRRIGATION

Problèmes concernant principalement la plante.

1. Pénétration et métabolisme des éléments minéraux, en particulier détermination de l'utilité du sodium et du rôle du chlore.
2. Absorption d'eau, transpiration, turgescence et plasmolyse, en fonction des teneurs en sels des organes de la plante et de la solution extérieure. Pression osmotique des sucs cellulaires.
3. Étude de la respiration des racines en milieu salin, avec ses conséquences sur l'absorption des sels et les équilibres ioniques ; résistance à l'asphyxie des racines suivant l'espèce et l'âge de la plante.
4. Effets biogéniques des sels à faibles doses et étude de la toxicité de chaque élément de chaque sel (doses toxiques et nature de la toxicité).
5. Étude des équilibres ioniques dans les solutions nutritives (y compris les solutions des sols) — antagonismes ioniques et antitoxicité. Équilibre physiologique des solutions nutritives (donc également des fumures).
6. Tolérance spécifique et variétale à l'égard des sels suivant la nature des sels, des solutions des sols et du climat, l'âge et le développement des plantes. Même étude concernant l'alcalinité.
7. L'adaptation des plantes à la salinité du milieu et à son alcalinité.
8. Effets des sels et de l'alcalinité sur les plantes (tous problèmes précédents, germination, croissance, anatomie, productivité totale et rendements utiles, qualités des produits, maladies et parasites).

Problèmes relatifs au sol.

1. La dynamique des sels dans les sols sous l'action des pluies, des irrigations, de la végétation.
2. Salinisation, salinité, solonetzification et de solodisation des sols. Effets des eaux saumâtres sur les sols et des eaux douces sur les sols salins.
3. La perméabilité du sol et ses modifications.
4. Humidité des sols et eau disponible pour les plantes (compte tenu des conséquences de la salinité).
5. Étude de la solution des sols et de ses modifications.
6. Étude de l'aération du sol (et des racines).
7. Étude de la microflore et de la fertilité des sols.
8. Étude des équilibres ioniques dans les solutions nutritives (y compris les solutions des sols) — antagonismes ioniques et antitoxicité. Équilibre physiologique des solutions nutritives (donc également des fumures). [Problèmes communs avec le point 5 de la section précédente.]

Problèmes concernant les eaux d'irrigation.

1. Composition des eaux (nature, concentration et proportions des sels dissous).
2. Leurs effets sur les sols, la solution et la microflore des sols, et les végétaux cultivés.
3. Les possibilités de leur emploi : *a*) immédiates (taux et nature de salinité) ; *b*) au long aller (balance des ions).
4. Les impossibilités, temporaires ou permanentes, de leur emploi (défaut de drainage ou insuffisance de lessivage, manque d'eau, toxicité de certains ions en excès, excès de salinité totale).
5. Correction des eaux.

Problèmes climatiques.

1. *Méditerranéens* (pluies d'hiver) : Lessivage et remontées des sels, danger de solonetzification des sols irrigués l'été à l'eau salée et lessivés l'hiver par les pluies.
2. *Désertiques* : Difficultés de lessivage et danger d'enrichissement excessif des sols en sels sous l'effet des eaux saumâtres d'irrigation et de l'excès d'évapotranspiration.

Problèmes agricoles.

1. Effets des sels et de l'alcalinité sur les plantes (tous problèmes précédents, germination, croissance, anatomie, productivité totale et rendements utiles, qualité des produits, maladies et parasites).
2. Conditions, modalités et techniques de l'emploi des eaux saumâtres : *a*) méthodes d'irrigation ; *b*) lessivage, dessalage, drainage, évacuation des eaux et sels en excès ; *c*) abondance, fréquence et suspensions éventuelles des irrigations ; *d*) étude des amendements à apporter pour éviter la dégradation des sols salins ou irrigués à l'eau saumâtre ou salée ; *e*) étude des fumures et engrais convenables ; *f*) travail judicieux des sols pour éviter l'accumulation des sels et la dégradation des sols.

3. Choix des espèces à cultiver et détermination des rotations culturales, en fonction : a) du sol et des eaux dont on dispose ; b) du système racinaire des espèces et de la nature des divers horizons (y compris la nature et la proximité relative de la nappe phréatique) ; c) des aptitudes particulières de chaque espèce ou variété à l'égard : 1° des sols (degré de tolérance), 2° de l'eau (pouvoir d'absorption et résistance à la sécheresse ou à l'asphyxie), 3° de l'air (résistance à l'asphyxie) ; et de leur résistance : 1° aux sels et au manque d'eau, 2° à l'excès d'eau, au défaut d'air et à l'asphyxie, 3° à l'alcalinité et à ses conséquences ; d) du climat, de ses variations et de ses rigueurs.

N.B. Ce tableau n'est certainement pas complet ; il n'est donc pas limitatif.

BIBLIOGRAPHIE

1. ADRIANI, M.S., *Recherches sur la synécologie de quelques associations halophiles méditerranéennes*, Montpellier, Station internationale de géobotanique méditerranéenne et alpine, 1934, communication n° 32, p. 9-31.
2. — *Sur la phytosociologie, la synécologie et le bilan d'eau des halophiles de la région néerlandaise méridionale ainsi que la Méditerranée française*, Montpellier, Station internationale de géobotanique méditerranéenne et alpine, communication n° 32.
3. ALADJENI, R., « Les sols d'Égypte », *Agriculture pratique des pays chauds*, Paris, 1932, p. 55.
4. ALEXEEV, V. P., « Les citrus dans la région d'Atrak et le problème de la lutte contre la salure des terres » [en russe], *Soviet subtropics*, Moscou, 1937, p. 28-34.
5. ANDRÉ, G., *Chimie agricole - Chimie végétale*, vol. I, Paris, J. B. Baillière et fils, 1924, 442 pages. (*Encyclopédie agricole*.)
6. — *Chimie agricole - Chimie végétale*, vol. II, Paris, J. B. Baillière et fils, 1924, 460 pages. (*Encyclopédie agricole*.)
7. ANONYME, *Analyse des eaux*, Laboratoire officiel de chimie agricole et industrielle de Casablanca, Direction de l'Agriculture, du commerce et des forêts, Division de l'Agriculture et de l'élevage, 3 pages dactylographiées.
8. — Lettre en date du 31 mars 1952, Wageningen, Centraal Instituut Voor Landbouwkundig Onderzoek, 2 pages dactylographiées.
9. — « Oasis de Sidi Ahmed Zaroug ; un exemple d'utilisation des eaux salées en agriculture », *Bulletin d'information de la quinzaine*, n° 11, Résidence générale de France à Tunis, 1941, p. 12-16.
10. — *The demineralization of brackish water*, Unesco/NS/AZ/61, 31 janvier 1952, 5 pages multigraphiées.
11. — *Rizière Tschivtakse*, extrait des *Rapports annuels de la mission anti-érosive* des années 1948, 1949 et 1950, Léopoldville (Congo belge), 2 pages dactylographiées.
12. ANTIPOV-KARATAEV, I. N., KOVDA, V. A., KACHINSKIJ, N. A., SOBOLEV, S. S., et ROZANOV, A. N., « La lutte contre la salification des sols irrigables » [en russe], *Pedology*, n° 2, Moscou, 1948, p. 133-141. (Analyse bibliographique dans le *Bulletin analytique du Centre national de la recherche scientifique*, vol. 10, 2^e partie, Paris, 1949, p. 2992.)
13. ARDRY, R., *L'eau. Modes de correction*, Tunis, Édition Maury, 1942, p. 202-219.
14. AUBERT, G., *Les sols de la France d'outre-mer*, Paris, 1941, Imprimerie nationale, 90 pages. (*Collection de monographies et mises au point publiées par les stations et laboratoires de recherches agronomiques*.)
15. — « Travaux récents sur les sols africains », *Revue de botanique appliquée et d'agriculture tropicale*, 22^e année, n° 254-255-256, Paris, 1942 (oct.-nov.-déc.), p. 495-500.
16. — *Les sols et l'aménagement agricole de l'Afrique-Occidentale française*, communication du Centre de pédologie de l'Office de la recherche scientifique outre-mer, Paris, 1952, 4 pages.
17. AUSTERWEIL, C., et L'AUXILIAIRE DES CHEMINS DE FER ET DE L'INDUSTRIE, *Procédé de traitement d'eaux saumâtres en vue de leur application à l'irrigation*, Paris, brevet d'invention Gr. 14, Cl. 6. n° 837.682, 15 février 1939, 2 pages.
18. BARBIER, G., « Action des chlorures et des sulfates sur la nutrition minérale de la plante », *C.R. Académie d'agriculture*, Paris, 1937, p. 699-706.
19. BARBIER, G., et CHAMINADE, R., « Contribution à l'étude quantitative de l'échange de cations dans les sols naturels minéraux », *Soil Research* (Association internationale de la science du sol), vol. 4, n° 1, 1934, p. 1-9.
20. BASILEVITCH, N. J., « Sur la classification des sols de la série salure de la dépression de Baroba » [en russe], *Pedology*, n° 3, 1952, édition de l'Académie des sciences, Moscou, p. 193-222.
21. BAYENS, J., « Studies op de in 1944 everstroomde poldergronden in België, 1^o mededeeling : Kalk-, Bowerkinge- en Bemestingspreefvolden in 1945 » (Étude sur les terrains des polders belges inondés en 1944), *Agricultura*, 45^e année, n° 1-2, Louvain (Belgique), mai 1947, p. 1-69.
22. BAYENS, J., et APPELMANS, F., « Studies op de in 1944 overstroomde poldergronden in België, 2^o mededeeling : Vegetatieproeven in 1946 », *Agricultura*, Louvain, février 1947, Bijzonder nummer, 122 pages.
23. BAYENS, J., SCHEYS, G., et GEESQUIERE, A., « Studies op de in 1944 overstroomde poldergronden in België, 3^o mededeeling : De veldproeven un 1946 », *Agricultura*, Louvain, avril 1947, Bijzonder nummer, 64 pages.
24. BERTRAND, G., « Recherches sur la présence générale et sur le rôle probable du sodium dans les plantes », *Annales de l'Institut national de la recherche agronomique*, série A, 2^e année, n° 4, Paris, juillet-août 1951, p. 409-413.

25. BIGNANI, F., « Dell'irrigazione con acque salate », *Agricoltura coloniale*, Florence, décembre 1932, tome 26, p. 585-589.
26. — « Acque e terre salate alcaline », *Agricoltura coloniale*, tome 27, Florence, 1933, p. 533-541. (Analyse bibliographique dans la *Revue de botanique appliquée et d'agriculture coloniale*, Paris, 1934, p. 73.)
27. BERG, C. VAN DEN, « De inundaties gedurende 1944-1945 en hun gavelgen voor de Landbouw. Doel. VI : De reastie van landbouwgewassen op het zoutgehalte van de bodem » (La réaction des plantes culturales sur la salinité du sol), *Verslagen van landbouwkundige onderzoekingen. Minist. v. Landbouw*, n° 56-16, 's-Gravenhage, 1950, 87 pages.
28. BOER, TH. A. DE., « Restoration of inundated grass lands » *Fifth international grassland congress 1949*, section III : *Sociology and ecology, botanical analysis*, Wageningen (Pays-Bas), 1944, p. 19-1 à 19-4.
29. BOISCHOT, P., et DROUINEAU, G., « Sur un cas d'effet dépressif produit sur la végétation par des eaux d'irrigation magnésiennes », *C.R. de l'Académie d'agriculture de France*, Paris, 1941, p. 36-42.
30. BONNIER, C., *Flore complète de France, Suisse et Belgique*, tome IX, Paris, Librairie générale de l'enseignement, et Bruxelles, Office de publicité, 123 pages.
31. BONNIER, C., et LECLERC DU SABLON, *Cours de botanique*, Paris, Librairie générale de l'enseignement, 2.584 pages.
32. BORDAS, J., et MATHIEU-REVERDY, G., « Essai de pédologie méditerranéenne », *Monographies publiées par les stations et laboratoires de recherches agronomiques*, Paris, Imprimerie nationale, 1943, 104 pages.
33. BRAUN-BIANQUET, J. *La phytosociologie au service du pays*, Montpellier, Station internationale de géobotanique méditerranéenne et alpine, 1949, communication n° 102, p. 6-17.
34. — *L'excursion de la S.I.G.M.A. en Catalogne*, Station internationale de géobotanique méditerranéenne et alpine, Montpellier, separata ex *Cavanillesia*, vol. VII, fasc. VI-XII, Barcelone, 25 juillet 1935.
35. BREIGNIÈRE, L., et VINCENT, V., « Amélioration des terrains salés », *C.R. de l'Académie d'agriculture de France*, séance du 25 novembre 1931.
36. BRYSSINE, G., *Étude expérimentale de l'irrigation du sol des Beni-Amir*, publication du Centre de recherches agronomiques de Rabat, 1945, 118 pages.
37. — « Humidité et possibilité de lessivage des sols au Maroc (Rabat) », *Transact. of the IV internat. Congress of Soil Science*, vol. I, Amsterdam, 1950, p. 64-66.
38. BRYSSINE, G., et CHEROTSKY, G., *Note sur la relation entre la salure du sol, celle de l'eau d'arrosage, et le régime des irrigations*, travail du Centre de recherches agronomiques de Rabat, communication faite au Congrès de l'Association française pour l'avancement des sciences, Tunis, mai 1951, 5 pages dactylographiées.
39. BUCHNER, A., « Zur Wirkung von Natrium und Chlor bei der Rubendüngung », *Zeltschrift für Akker- und Pflanzenbau*, Band 93, Heft 4, 1951, p. 523-528. (Extrait analytique communiqué par Verbek, P., bibliothécaire du Centraal Instituut voor Landbouwkundig onderzoek de Wageningen.)
40. BUROLET, P. A., « Considérations dynamogénétiques sur le *Salicornietum* de quelques sebkhas tunisiennes », *Association française pour l'avancement des sciences, 49^e session*, Grenoble, 1925, p. 352-355.
41. CAGLAR, K. O., *Anadolu Sartlarma Göre Su Ve Toprak Münasebelerinin Arastirimi (Wasser und Boden unter Berücksichtigung der Anatolischen Verhältnisse)*, Ankara, Yüksek Ziraat Enstitüsü, 1937 ; en turc, 52 pages, et en allemand, 101 pages, 11 tableaux.
42. CHEVALIER, A., « Les Nitraria, plantes utiles des déserts salés », *Revue de botanique appliquée et d'agriculture tropicale*, tome 29, Paris, 1949, p. 595-601.
43. CHEVALIER, G., « Sur un facteur de toxicité végétale en Afrique du Nord », *Revue agricole de l'Afrique du Nord*, n° 810, Alger, 1935, p. 86-88.
44. — « Agrologie et irrigation », *Revue française de l'oranger*, n° 213, Casablanca, avril 1950, p. 115-124.
45. — « Sur la diagnose électrique des états de salure et de sécheresse des sols nord-africains », *Revue française de l'oranger*, n° 227, Casablanca, juillet-août 1951, p. 229-234.
46. — « Nouvelles données sur l'amélioration de certains sols nord-africains », *Revue française de l'oranger*, n° 224, Casablanca, 1951, p. 124-126.
47. — « Pluies et sols de l'Algérois ; pluies à Alger au cours de la campagne 1949-1950 et apports salins aux sols », *Annales de l'Institut agricole et des services de recherches et d'expérimentation agricoles de l'Algérie*, tome 6, fasc. 3, Alger, août 1951, 9 pages.
48. CHODAT, R., *Principes de botanique*, 2^e éd., Paris, J. B. Baillière et fils, et Genève, Georg et C^{ie}, 1911, 842 pages.
49. CLAERHOUT, L., « Le traitement des terres inondées en 1944 », *Publications de l'Institut belge pour l'amélioration de la betterave*, 15^e année, n° 3, Tirlemont (Belgique), 1947, p. 92-97.
50. COMBES, R., *La vie de la cellule végétale*, volume I : *La matière vivante*, 2^e éd., Paris, Armand Colin, 1933, 216 pages.
51. — *La vie de la cellule végétale*, volume II : *Les enclaves de la matière vivante*, Paris, Armand Colin, 1929, 220 pages.
52. — *La vie de la cellule végétale*, volume III : *L'enveloppe de la matière vivante*, Paris, Armand Colin, 1937, 216 pages. (*Collection Armand Colin*, n° 203.)
53. COUPIN, H., « Sur la toxicité du chlorure de sodium et de l'eau de mer à l'égard des végétaux », *Revue générale de botanique*, tome 10, Paris, 1898, p. 177-190.
54. — « Sur la toxicité des composés alcalino-terreux à l'égard des végétaux supérieurs », *C.R. de l'Académie des sciences*, tome 30, Paris, 1900, p. 791.
55. DASSONVILLE, Ch., « Influence des sels minéraux sur la forme et la structure des végétaux », *Revue générale de botanique*, tome 10, Paris, Éditions P. Dupont, 1898, p. 15-32, 59-68, 102-124, 161-170, 193-199, 238-260, 289-304, 335-344 et 370-380.
56. DECoux, L., et SIMON, M., « Les problèmes posés à l'agriculture belge par les inondations à l'eau saumâtre en 1944 », *Publications de l'Institut belge pour l'amélioration des betteraves*, 13^e année, n° 3, Tirlemont (Belgique), mai-juin 1945, p. 112-185.
57. DEHERAIN, F., *Cours de chimie agricole*, Paris, Hachette, 1873, 565 pages.
58. DELOFFRE, G., « Sur la remise en état des terrains inondés par l'eau de mer », *C.R. des séances de l'Académie des sciences*, tome 220, Paris, 1945, p. 255-257.
59. — « La remise en culture des terres de la région de Dunkerque inondées par l'eau de mer en 1944-1945 », *C.R. de l'Académie d'agriculture*, tome 36, Paris, 1950, p. 581-583.

60. DEMOLON, A., *Principes d'agronomie*, tome I : *Dynamique du sol*, 5^e éd., Paris, Dunod, 1952, 520 pages.
61. — *Principes d'agronomie*, tome II : *Croissance des végétaux*, 4^e éd., Paris, Dunod, 1950, 471 pages.
62. DESSUS, P., « Note sur l'utilisation des eaux salées dans les territoires du sud », *Tunisie agricole*, tome 51, n° 3, Tunis, mars 1950, p. 34-46.
63. DHIR, R. D., « Recherches hydrologiques dans les régions arides et semi-arides de l'Inde et du Pakistan », *Comptes rendus des recherches effectuées sur l'hydrologie de la zone aride*, Paris, Unesco, 1952, 217 pages.
64. DINO, E. A., « État des terrains argileux après la première année de lessivage » [en russe], *Bokl. vsesoj. Akad. sel'skokh. Nauk Im Lenina.*, 14, n° 6, U.R.S.S., 1949, p. 73-77. (*Bulletin analytique du Centre national de la recherche scientifique*, vol. 11, n° 8, Paris, 1950, 2^e partie, p. 1706.)
65. DONA DALLE ROSE, A., « Contributo di studi e ricerche alla redenzione dei terreni 'Salsoalcalini' », *La Ricerca Scientifica*, 17, Italie, 1947, 50 pages.
66. DORF-PETERSEN, K., et STEENBJERG, F., « Investigations of the effect of fertilizers containing sodium », *Plant and Soil*, vol. 2, n° 3, 's-Gravenhage, juillet 1950, p. 283-300.
67. DORSMAN, C., et WATTEL, M., « De inundaties gedurende 1944-1945 en hun gevolgen voor de landbouw. T. 7. : Zoutschade bij tuinbouwgesassen », *Ministr. v. Landbouw, visserij en voedselvoorziening*, n° 57-58, Pays-Bas, p. 53.
68. DROUINEAU, C., COUNY, P., et LEFEVRE, C., « Sur les conditions particulières de formation d'un sol à alcalis », *C.R. de l'Académie d'agriculture*, tome 34, Paris, 1948, p. 565-567.
69. DUPONT, G., « Action exercée par les chlorures sur les plantes et sur les sols », *Annales des sciences agronomiques françaises et étrangères*, n° 6, Paris, Éditions Berger-Levrault, 1924, p. 369-391.
70. DURAND, J., « Essais de laboratoire effectués sur les sols de la station hydroagricole de Hamadéna », *Terres et eaux*, n° 13, Alger, 1951, 8 pages.
71. EMBERGER, L., « Aperçu général sur la végétation du Maroc et carte phytogéographique du Maroc », *Mémoire hors série de la Société des sciences naturelles du Maroc*, 1 carte du Maroc au 1/1.500.000. (Extrait de : E. RUBEL et W. LÜDI, *Ergebnisse der internationalen pflanzengeographischen Exkursion durch Marokke und Westalgerien 1936*, Veroff. Oeobet, Inst. Rümel in Zurich, 14. Heft, 1939, Berne.)
72. EMBERGER, L., et MAIRE, R., « Tableau phytogéographique du Maroc », première partie, *Mémoires de la Société des sciences naturelles du Maroc*, Rabat, Paris, Londres, 15 mai 1934, 16 planches, 1 carte, 187 pages.
73. EPERJESSY, C., *Les progrès de l'agriculture*, 110^e cahier, 5^e année, Berlin, 15 avril 1930.
74. EPISOV, M. S., « La culture du riz sur les terrains salés », *L'agronomie soviétique*, n° 12, décembre 1947. (Dans *l'agronomie tropicale*, France, oct.-sept. 1949, vol. IV, n° 9-10, p. 540-541.)
75. EYK, M. VAN, « Analyse der Wirkung des NaCl auf die Entwicklung Sukkulenz und Transpiration bei *Salicornia herbacea.*, sowie Untersuchungen über den Rinfluss der Salzaufnahme auf die Würzelatmung bei *Aster Tripolium* », *Recueil de travaux botaniques néerlandais*, 36, 1939, p. 559-657.
76. FEDOROV, B. V., « The utilisation of waters high in mineral content for irrigation » [en russe], *Pedology*, Moscou, 1947, p. 137-141.
77. FINIELZ, N., « Problèmes techniques posés par les irrigations en Tunisie », *C.R. du Congrès du cinquantenaire de l'École coloniale de Tunis*, tome 2, Tunis, 1950, p. 227-248.
78. FLAHAULT, Ch., *La distribution géographique des végétaux dans la région méditerranéenne française*, Paris, Paul Lechevalier, 1937, 178 pages. (*Encyclopédie biologique*, vol. 18.)
79. FONTES, F. CARVALHO, « Algumas características fitosociológicas dos 'salgados' de Sacavem », *Boletim da Sociedade Broteriana*, Coïmbre, 1945.
80. FREY, R., « Les analyses d'eau et leur interprétation géologique », *Notes et mémoires du Service des mines et de la carte géologique du Maroc*, n° 26, Rabat, 1933, 68 pages.
81. FROLOW, V., « Régime des sels dissous dans les eaux des rivières de la région de Damas », *C.R. de l'Académie des sciences*, tome 195, n° 6, Paris, 1932, p. 426-428.
82. — « Le régime des sels dissous dans les eaux du Sandjak autonome d'Alexandrette », *C.R. de l'Académie des sciences*, tome 201, n° 15, Paris, 1935, p. 613-615.
83. GATTA, L. DELLA, « Ricerche sulle acque irrigazione della Tripolitania », *Centre Sperimentale Agr. e. Zett. della Libia*, n° 32, Tripoli, 1941, 40 pages.
84. — *Acque di irrigazione della Tripolitania. L'acqua di Therga*, manuscrit communiqué par le Ministero dell'Agricoltura delle Foreste, Rome, 5 juin 1952, 12 pages dactylographiées.
85. GAUCHER, C., « Observations hydrogéologiques sur la plaine de Perréaux », *Bull. du Service de la carte géologique de l'Algérie*, 3^e série, 4^e fasc., Alger, 1948, 49 pages.
86. — Observations sur la salure des terres et les effets des façons aratoires en Oranie orientale », *C.R. de l'Académie d'agriculture de France*, tome 32, Paris, 1946, p. 315-320.
87. — « Méthodes actuelles d'étude des terrains salés en Afrique du Nord », *C.R. de la conférence de pédologie méditerranéenne Alger-Montpellier*, 1947, p. 455-472.
88. — « Essai d'une représentation cartographique des facteurs de salure de la plaine de Relizane », *Bulletin du Service de la carte géologique de l'Algérie*, 3^e série, 10^e fasc., Alger, 1950, 64 pages.
89. — « Mise en valeur par l'irrigation des terres salées. Les enseignements fournis par la mise en valeur des périmètres irrigables d'Algérie », *La Tunisie agricole*, vol. 51, n° 1, Tunis, 1950, p. 16-32.
90. GAUCHER, C., et SIMONNEAU, P., « Monographie agricole de la plaine de Saint-Denis du Sig », *Terres et eaux*, nos 14 et 15, Alger, 1951, 70 pages.
91. GOLOUGH, B. M., et CHAVRYCHINE, P. I., « Importance de la composition minérale de certains végétaux spontanés pour la pédogénèse des sols de Baraba » [en russe], *Pedology*, n° 12, Moscou, décembre 1951, p. 736-741. (Analyse bibliographique communiquée par B. Tkatchenko.)
92. GOUNY, P., et M^{lle} MAZOYER, R., « Les sels de la zone côtière du sud-est de la France », 2^e mémoire : « Sols salins en Provence orientale », *Annales agronomiques*, n° 3, Paris, 1949.
93. GRANDE COVIAN, R., « Los deltas españolas y sus posibilidades agrícolas », *Boletín oficial de la Asociación Nacional de Ingenieros Agrónomos*, n° 3, Madrid, avril 1951, p. 3-10.

94. GRANDE COVIAN, R., « Rescate para su puesta en cultivo de los terrenos marismenos o salinizados », *Comunicación al II Congreso Nacional de Ingeniería*, Madrid, 1952, 7 pages.
95. GREENE, H., « Soil profile in the eastern Gezira », *The journal of agr. science*, vol. 18, 3^e partie, Cambridge, 26 juillet 1928, p. 518-530.
96. — « Soil permeability in the eastern Gezira », *The journal of agr. science*, vol. 18, 3^e partie, Cambridge, 26 juillet 1928, p. 531-543.
97. — *Utilisation des terres salines*, Washington, Rome, décembre 1948, 53 pages. (F.A.O., étude n° 3.)
98. GREENE, H., et PETO, R.B.K., « The effect of irrigation on soil salts at the Gezira research farm, Wad Modani, Sudan », *The journal of agr. science*, vol. 24, 1^{re} partie, Cambridge, janvier 1934, p. 43-58.
99. GRILLOT, G., « La zone méditerranéenne », *Les cahiers de la recherche agronomique*, n° 2, Rabat, Service de la recherche agronomique et de l'expérimentation agricole, 1949, p. 3-12.
100. GRILLOT, G., et BRYSSINE, G., *Les sols et les eaux salées* (rapport inédit), Centre de recherches agronomiques de Rabat, 1942, 2 pages dactylographiées.
101. — « L'irrigation et ses problèmes », *La terre marocaine*, n° 207, Casablanca, février 1947, p. 43-47.
102. — « Contribution à l'étude de l'humidité des sols du Maroc », *C.R. de la Conférence de pédologie méditerranéenne, Alger-Montpellier, 1947*, Paris, Association pour l'étude du sol, p. 420-433.
103. GUERILLOT, J., *Contribution à l'étude du chlore en biochimie végétale*, Paris, Librairie Le François, 1937, 72 pages.
104. — Chlorures et végétation, *Chimie et industrie*, vol. 41, n° 4, Paris, 1939, p. 648-652.
105. GUERMANOV, F. N., « Biologie et biodynamique des solonchaks, solonetz et sols solodisés » [en russe], *Pedology*, n° 3, Moscou, 1933, p. 203-208.
106. HALLEGREN, G., « On the physical and chemical effects of saline irrigation water on soils », *College of Sweden*, vol. 12, Upsala, 1944, p. 23-48.
107. HAYWARD, H. E., et WADLEIGH, C. H., « Plant growth on saline and alkali soils », *Advances in Agronomy*, vol. I, New York, Academic Press Inc., 1949, p. 1-38.
108. HEDIN, L., Lettre, Rouen, 19 mars 1952, 1 page dactylographiée.
109. HUDSON, P. S., et RICHENS, R. H., *The new genetics in the Soviet Union*, Cambridge, Imperial Bureau of Plant Breeding and Genetics, School of Agriculture, mai 1946, 8 pages.
110. HUGUET DEL VILLAR, E., *Geobotanica*, Barcelona, 1929, 339 pages. (Colección Labor, Biblioteca de iniciación cultural.)
111. — *Los suelos de la Península Luso-Iberica*, Madrid, Londres, Thomas Murby & Co., 1937, 416 pages.
112. IBRAHIM MUSTAPHA EFFENDI, A., « Les terres salées », *La revue agricole* [en arabe], Le Caire, Ministère de l'Agriculture, Imprimerie El Amria, juil.-sept. 1950, 19 pages.
113. ITALIE, Th. B. VAN, « The role of sodium in the cation-balance of different plants », *Transactions of the Third International Congress of Soil Science*, vol. 1, Oxford, 1935, p. 191-194.
114. JAGER, N. DE, *Ziekteverschijnselen van enkele cultuurgewassen als gevolg van de inwerking van keukenzout* (The detrimental effect of sodiumchloride on plants), Baarn, N.V. Mollandia-Drukkorij, 1933. 95 pages.
115. JAVILLIER, M., *Les éléments chimiques et le monde vivant*, Paris, Flammarion, 1952, 262 pages (*Bibliothèque de philosophie scientifique*).
116. JOSEPH, A. F., et OAKLEY, H. B., « The properties of heavy alkaline soils containing different exchangeable bases », *The journal of agr. science*, vol. 19, 1^{re} partie, Cambridge, janvier 1929, p. 121-131.
117. JOSEPH, A. F., et WHITFIELD, B. W., « The organic matter in heavy alkaline soils », *The journal of agric. science*, vol. 17, 1^{re} partie, Cambridge, janvier 1927, p. 1-11.
118. KACHKAROV, D. N., et KOROVINE, E. P., *La vie dans les déserts*, édition française par T. Monod, Paris, Payot, 1942, 341 pages.
119. KELLER, B., « Die Vegetationen auf den Salzböden der russischen Halbwüsten und Wüsten », *Zeitschrift f. Bot.*, n° 18, Allemagne, 1926, p. 113-137.
120. KILLIAN, CH., « L'amélioration du sol dans les pays steppiques et le rôle de la botanique agricole. Ce que j'ai vu en Hongrie; ce que l'on pourrait faire en Afrique du Nord », *Gouvernement général de l'Algérie, Service botanique : Bulletin*, n° 75, Alger, 1931, p. 424-639.
121. KILLIAN, CH., et FAUREL, « Observations sur la pression osmotique des végétaux désertiques et subdésertiques de l'Algérie », *Société botanique de France*, tome 80, n° 9-10, Paris, 1933, p. 175-178.
122. — « Conditions édaphiques et ravitaillement en eau chez les plantes du désert », extrait de la *Revue scientifique* du 11 août 1934.
123. — « Étude sur la biologie des sols des hauts plateaux algériens », *Annales agronomiques*, tome 6, n° 4 (juillet-août), p. 595-614; et n° 5 (septembre-octobre), p. 702-722, Paris, 1936.
124. — « Étude sur la biologie des sols des hauts plateaux algériens », *Annales agronomiques*, tome 7, n° 2-3 (mars-avril et mai-juin), Paris, 1937, 75 pages.
125. — « Contribution à l'étude écologique des végétaux du Sahara et du Soudan tropical », *Bulletin de la Société d'histoire naturelle d'Afrique du Nord*, tome 28, n° 1^{er} Alger, 1937, p. 12-18.
126. KILLIAN, CH., « Études comparatives de la biologie des sols du Nord et du Centre sahariens », *Annales agronomiques*, n° 1, Paris, janvier-mars 1940, p. 56-100.
127. — « Les recherches de biologie expérimentale faites au laboratoire de biologie saharienne de Beni-Oumif au cours des dix dernières années », *Bulletin de la Société d'histoire naturelle d'Afrique du Nord*, tome 31, Alger, 1940, p. 127-139.
128. — « Sols et plantes indicatrices dans les parties non irriguées des oasis de Figuig et de Beni-Oumif », *Bulletin de la société d'histoire naturelle de l'Afrique du Nord*, tome 32, n° 8-9, Alger, 1941, p. 301-314.
129. — « Mesures écologiques sur des végétaux types, du Fouta Djalon (Guinée française) et sur leur milieu, en saison sèche », *Bulletin de l'institut français d'Afrique noire*, tome 13, Dakar, septembre 1951, p. 601-672.
130. KILLIAN, CH., et LEMÉE, G., « Étude sociologique, morphologique et écologique de quelques halophytes sahariens », *Revue générale de botanique*, tome 55, n° 658, Paris, décembre 1948, p. 376-402; et tome 56, n° 569, janvier 1949, p. 28-48.
131. KLINTWORTH, H., « Utilisation of brack water. Methods of overcoming its harmful effects under irrigation », *The Farmer's weekly*, Prétoria, décembre 1945, p. 971.

132. KLINTWORTH, H., « The use of brack water for irrigation », *Farming in South Africa*, vol. 27, n° 311, Prétoria, février 1952, p. 45-51.
133. — *The quality of irrigation waters* (inédit), Prétoria, 1952, 32 pages dactylographiées.
134. KONDRACHOV, *L'agriculture irriguée* [en russe], Moscou, 1948, 500 pages. (Analyse bibliographique communiquée par B. Tkatchenko.)
135. KOSTIAKOFF, A. W., *Eléments fondamentaux de l'irrigation et du drainage* [en russe], 1933. Traduction française (inédite) du chapitre XI, par P. Gorskine et G. Cherotzky, Rabat, 1947, 109 pages dactylographiées.
136. KOVDA, V. A., « Die typender alkalihoden (Solonzaï) », *III^e Congrès international de la science du sol*, Oxford, 1935, p. 99-102.
137. — *Origine et évolution des sols salins* [en russe], Moscou, édition de l'Académie des sciences de l'U.R.S.S., 1946, 568 pages. (Analyse bibliographique communiquée par B. Tkatchenko.)
138. — « Lutte contre l'invasion du sel dans les sols irrigués » [en russe], *Pedology*, n° 10, Moscou, 1947, p. 634-640. (Analyse bibliographique dans le *Bulletin analytique du Centre national de la recherche scientifique*, vol. X, n° 3, Paris, 1949, 2^e partie, p. 1130.)
139. KRIMGOLD, D. B., « Kostiakov : on prevention of waterlogging and salinity of irrigated land », *Agricultural engineering*, Chicago, 1945, p. 327-328. (Analyse bibliographique de Yankevitch dans le *Bulletin du Service botanique et agronomique de Tunisie*, n° 16, Tunis, mai 1949, p. 6-7.)
140. LAGOUNOVA, E. P., « Le rôle des masses radiculaires dans la désolonetziation du sol » [en russe], *Pedology*, n° 1, Moscou, 1952, p. 28-40. (Analyse bibliographique communiquée par B. Tkatchenko.)
141. LATHOUWERS, V., *L'amélioration du froment*, Paris, Librairie agricole de la maison rustique, et Gembloux (Belgique), Duculot, 1942, 433 pages.
142. LEHR, J. J., « The importance of sodium for plant nutrition. IV. Influence of nitrate fertilizers on the equilibrium of cations in fodder beet », *Soil science*, vol. 63, n° 6, Baltimore, 1947, p. 479-486.
143. LEMMET, J., « Notes d'agronomie saharienne ayant trait à l'utilisation judicieuse des eaux dans les oasis algériennes », *Congrès de l'eau*, Alger, 1928.
144. LEMMET, J., et SCORDEL, M., « Contribution à l'étude agrologique de la vallée du Bas-Sénégal », *Bulletin du Comité des études historiques et scientifiques de l'A.-O.F.*, I, Paris, Librairie Larose, janvier-mars 1918, p. 17-56.
145. LESAGE, P., « Comparaison de l'action du chlorure de sodium, du chlorure de potassium et de la sylvinite riche sur les plantes cultivées », *Annales de la Société agronomique*, tome 42, fasc. 3, Paris, Éditions Berger-Levrault, 1925, p. 172-190.
146. — « Essais de germination des graines de cresson alénois dans des conditions très diverses », *C.R. de l'Académie des sciences*, tome 163, n° 19, Paris, 1916, p. 486-489.
147. LEWIS, A. H., et NEAVE O., « Removal of plant nutrients by irrigation from soils in the Canary Isles », *Transactions of the Third International Congress of Soil Science*, vol. I, Oxford, 1935, p. 407-409.
148. LONG G., « Les méthodes phytosociologiques et leur application en agriculture tunisienne », *Congrès du cinquantième de l'École d'agriculture de Tunis*, tome 2, Tunis, avril-mai 1950, p. 185-198.
149. LUGAN, J., « Résistance des plantes à la salure des eaux », *Agriculture*, n° 134, Paris, avril 1952, p. 111.
150. MAGISTAD, O. C., « Plant growth relations on saline and alkali soils », *The Botanical review*, vol. 2, n° 4, New York, avril 1945, p. 181-230.
151. MANQUENE, J., *Agrologie de l'Oranie orientale* (thèse), Mostaganem, Imprimerie artistique, 1925, 210 pages.
152. — « Les terrains salés de l'Oranie, *Fédération des syndicats agricoles de l'Oranie, assemblée générale*, Tlemcen, 1926, 10 pages.
153. — « Du Chélif à la Grande Sebka, terrains et eaux chlorurés du département d'Oran », *Congrès de l'eau*, n° 35, Alger, 1928, 23 pages.
154. — « La plaine d'Oran et la Grande Sebka », *Bulletin économique de l'O.F.A.L.A.C.*, Alger, décembre 1933 et janvier 1934, 18 pages.
155. — *Contribution à la mise en valeur de la plaine de Chélif par l'irrigation. Les terrains salés du Bassin du Chélif*, Alger, Imprimerie Minerva, 1935, 48 pages.
156. MARAEWA, M., « Zur Frage der Chlorophobie der Pflanz », *Bodenk. u. Pflanzenern.*, I, n° 1-2, 1936, p. 39-57.
157. MARTINE, P., « Premiers travaux de mise en valeur du delta du fleuve Sénégal », *Agronomie tropicale*, n° 1-2, Nogent-sur-Marne (France), 1948, p. 3-17.
158. MARTINE, P., et BOUYER, « La fumure des rizières à Richard Toll », *Agronomie tropicale*, n° 7-8, Nogent-sur-Marne (France), 1951, p. 370-383.
159. MAUME, L., et DULAC, J., « Minimum de toxicité d'un mélange de deux sols à l'égard des végétaux », *C.R. de l'Académie des sciences*, tome 184, n° 18, Paris, 2 mai 1927, p. 1081.
160. — « Corrélation entre l'antagonisme positif et l'absorption par le végétal », *C.R. de l'Académie des sciences*, tome 187, n° 18, Paris, octobre 1928, p. 769.
161. — « Le problème de la toxicité et de l'antagonisme en physiologie végétale », *Annales de la science agronomique française et étrangère*, tome 46, n° 4, Paris, Éditions Berger-Levrault, juillet-août 1929, p. 400-443.
162. MENCHIKOVSKY, P., *Composition of Palestine waters according to the natural conditions of the land* [en hébreu et résumé en anglais], Tel Aviv, Agr. Exper. Stat. and Colon. Department Extens. Divis., juillet 1929, 10 pages.
163. MICHELI, A., *Considerazioni sull'impiego delle acque salmastre nelle irrigazioni in Cirenaica*, Istit. Agronom. per l'Afr. ital., Florence, 1944, 6 pages.
164. MIEGE, E., « La question des eaux salées au Maroc », *Revue de géographie marocaine*, Casablanca, septembre 1952, 56 pages.
165. MOLLIARD, M., *Nutrition de la plante*, tome I : *Échanges d'eau et de substances minérales*, Paris, Éditions Doin, 1921, 372 pages. (*Encyclopédie scientifique*.)
166. MUNTZ, A., et GIRARD A., *Les engrais*, tome 3, Paris, Firmin-Didot et C^{ie}, 1893, 627 pages. (*Bibliothèque de l'enseignement agricole*.)
167. NAAS, O., *Bruna bônar ar kënelig fër bevatning med salivatten* (Le haricot rouge réagit négativement à l'eau salée) [en suédois], don de la bibliothèque de Kungl Lantbrukahögskolan, Upsala, 1952, 5 pages.
168. NEIGEBAUER, *The suitability of surface and ground waters and their classifications in the natural conditions of Vojvodina* [en russe], 9 pages. (Analyse bibliographique dans *Bibliographie sur l'utilisation de l'eau salée en agriculture* (manuscrit), Paris, Commission internationale des industries agricoles, 1951.)

169. NOVIKOFF, V., « Les eaux salées et les plantes cultivées », *Bulletin de la Société d'horticulture de Tunisie*, 30^e année, n° 286, Tunis, 1932, p. 74-76, et n° 287, p. 98-101.
170. — « Le acque salate e le piante coltivate », *Agricoltura coloniale*, tome 26, n° 8, Florence, 1932, p. 391-396.
171. — « Note sur l'utilisation des eaux salées », *Annales du Service botanique et agronomique de Tunisie*, vol. 19, Tunis, 1946, 26 pages.
172. OLSEN, C., « The significance of concentration for the rate of ion absorption by higher plants in water culture », *Comptes rendus du Laboratoire de Carlsberg*, série chimique, vol. 26, II, 1950. (Analyse bibliographique dans les *Annales agronomiques*, 2^e année, n° 3, Paris, Dunod, mai-juin 1951, p. 390.)
173. PANTANELLI, E., « Influenza della concentrazione sul meccanismo di assorbimento nelle piante », *Stazione Agrar. Sper. di Bari* (Italie), p. 163-180.
174. — « Irrigazione con acqua salmastra », *Staz. Agrar. Sper. Bari*, n° 26, 1937, 80 pages.
175. — « Irrigazione con acqua salmastra », *Agricoltura coloniale*, vol. 35, n° 9, Florence, 1941, 3 pages.
176. — *Problemi agronomici del Mezzogiorno*, 2^e éd., Bologne (Italie), Edizioni Agricole, 1950, 327 pages.
177. PAPADAKIS, J. S., *Écologie agricole*, Gembloux (Belgique), Duculot, et Paris, Librairie agricole de la maison rustique, 1938, 312 pages.
178. PASSERINI, N., « Innaffiatura con acqua di mare », *Bell. del R. istituto agraria di Pisa*, vol. 7, 1931, 8 pages.
179. PASSERINI, N., et GALLI, F., « Sperimenti intorno all'azione del cloruro sodico contenuto nell'acqua di irrigazione su di alcune piante coltivate », *Atti della R. Accademia dei Georgofili* (Italie), vol. 24, 1927, 65 pages.
180. PEGLION, V., « Colonie alofile e salsedine nei terreni del Ferrarese », *Stazione Agraria Sperim. di Modena*, vol. 61, 1908, p. 89.
181. PENET, P., « Quelques particularités de l'irrigation d'oasis », *Bulletin de la Direction de l'agriculture de Tunisie*, 1913, p. 371-380.
182. PUFFELES, M., « Effect of saline water on mediterranean loess soils », *Soil science*, vol. 47, n° 6, Baltimore, 1939, p. 447-454.
183. RATNER, E. I., « Interaction between roots and soil colloids as a problem of the physiology of mineral nutrition of plants. I. Instable equilibria in the cation exchange between the roots of plants and the soil colloide » [en russe], *C.R. (Doklady) Académie des sciences*, vol. 42, U.R.S.S., 1944, p. 315-317. (Analyse bibliographique dans le *Bulletin du Service botanique et agronomique de Tunisie*, n° 16, mai 1949, p. 7.)
184. RAVIKOVITCH, S., « Methods of irrigation and their effects on soil salinity and crops », *Agricultural research station bull.*, Rehovot, n° 40, Palestine, octobre 1946, 36 pages.
185. — « The saline soils of the Lower Jordan Valley and their reclamation », *Agricultural research station bull.*, Rehovot, n° 39, Palestine, 1946, 45 pages.
186. RAVIKOVITCH, S., et BIDNER, « The deterioration of grape-vines in saline soils » *The Empire journal of exper. agr.*, vol. 5, n° 19, juillet 1957, p. 197-203.
187. — « Effects of soil salinity on clover in the Yezreel Valley », *The Empire journal of exp. agr.*, vol. 8, n° 31, juillet 1940, p. 207-214.
188. RAVIKOVITCH, S., et BIDNER-BAR HAVA, « The saline soils in the Zevulun Valley », *Agricultural research station bull.*, Rehovot, n° 49, Palestine, mai 1948, 39 pages.
189. REBOUR, H., « Utilisation des eaux salées », *Revue agricole de l'Afrique du Nord*, n° 1229, Alger, 1944, p. 115-116.
190. — « Les doses limites du sel », *Revue agricole de l'Afrique du Nord*, n° 1586, Alger, 1949, p. 858-859.
191. REIFENBERG, A., « The influence of salt solutions on the intake of ions by barley seedlings », *C.R. de la Conférence de pédologie méditerranéenne, Montpellier-Alger, 1947*, Paris, Association pour l'étude du sol, p. 434-441.
192. REIFENBERG, A., et ROSOVSKY, R., « Saline irrigation water and its effects on the intake of ions by barley seedlings », *Palestine J. Botany*, 4 janvier 1947, p. 1-12.
193. RENAUD, « La solidification du sol, maladie des terres irriguées », *Revue agricole de l'Afrique du Nord*, n° 1688, Alger, 1951, p. 541-542.
194. REYNAUD-BEAUVERIE, M. A., *Le milieu et la vie en commun des plantes*, vol. 14, Paris, Paul Lechevalier, 1936, 237 pages. (*Encyclopédie biologique*.)
195. RISLER, E., et WERY, G., *Irrigations*, Paris, J. B. Baillière et fils, 1922, p. 532. (*Encyclopédie agricole*.)
196. ROLET, A., « Comment se comporte en terrain salé les plantes cultivées. Amélioration, utilisation de la flore naturelle », *Revue générale des sciences pures et appliquées*, tome 39, n° 6, Paris, mars 1928, p. 175-181.
197. ROSEAU, N., et GAUCHER, G., *La mise en valeur des terrains à texture délicate et des terrains salés. Rapport présenté à l'Institut agricole d'Algérie*, Alger, Imprimerie Vollet, 1942, 36 pages.
198. ROWAN, P. A., « Zout en chloorschade bij de versdullen de gewassen », *Maandblad voor de Landbouw voor lichtingsdienst*, 5, 1948, p. 220-299. (Extrait analytique de P. Verkork, bibliothécaire du Centraal Instituut voor Landbouwkundg onderzoek de Wageningen.)
199. ROZOV, L. P., *Pédologie appliquée à l'amélioration des sols* [en russe], OGIZ (Éditions d'État réunies) : Selkhozgiz, Moscou, 1936, 495 pages. (Analyse bibliographique de G. Bryssine, Centre de recherches agronomiques de Rabat, 1942.)
200. RUSSELL, E. J., *Soil conditions and plant growth*, Londres, Longmans, Green and Co., 1952, 606 pages.
201. SALEMA, VEIGUINHA, A., CABRAL, J. A., et SALLES VIANA, M. C., « Ensaio de dessalgamento », *Separata da Revista agronomica*, tome I, Lisbonne, 1945, p. 97-110.
202. SANNA, A., « Influenza del sale marino sulle piante », *Stazione Sperimentale Agraria*, vol. 37, Italie, 1904, p. 137 et suivantes.
203. SAUVAGE, CH., « La richesse de la flore marocaine », *Bulletin de l'enseignement public au Maroc*, n° 216, Rabat, premier trimestre 1952, p. 11.
204. SCHRATZ, E., « Beiträge zur Biologie der Halophyten. II. Untersuchungen über den Wasserhanshalt », *Jahrbuch f. Wiss. Bot.*, n° 81, 1934, p. 59-93.
205. SHAWARBI, M. Y., « The status of phosphates in saline and alkaline soils with special reference to Egyptian soils », *Fourth International Congress of Soil Science*, vol. II, communication n° 152, Amsterdam, 1950, p. 262-265.
206. SIGMOND, A. A. J. DE, *Hungarian alkali soils and methods of their reclamation*, Berkeley, University of California, 1927, 156 pages.
207. — « The classification of alkali and salty soils », *Proceedings of First International Congress of Soil Science*, vol. I, Washington, 1927, p. 330-334.
208. SINAK, M., « Om bevattning av tallsadd med saltvatten » (On watering of pine seeds with sea water) [en suédois,

- résumé en anglais], *Statens Skogsforskningsinstitut Band*, 41, n° 4, 1952, 14 pages.
209. SIMONNEAU, P., « Observations sur le comportement des agrumes en présence du salant », *Revue française de l'oranger*, n° 164, Casablanca, 1945, p. 259-268.
210. — « Observations sur la résistance au sel du cotonnier », *Revue française de l'oranger*, n° 166, Casablanca, février 1946, p. 43-46.
211. — « La création d'une orangerie en terrain salé », *Revue française de l'oranger*, n° 178, Casablanca, 1947, p. 93-96.
212. — « Note sur la mise en valeur des terrains salés de la plaine de Perrégaux », *Terres et eaux*, n° 12, Alger, janvier 1951, 9 pages.
213. — « Note sur la résistance au sel de quelques plantes cultivées ; observations faites dans les terrains salés des plaines sublittorales d'Oranie », *Revue française de l'oranger*, n° 229, Casablanca, octobre 1951, p. 319-322.
214. SOKOLOV, A., « Significance of soil type and of its mechanical composition for the sensitiveness of plants to chlorine » [en russe, résumé en anglais], *Pedology*, n° 3, Moscou, 1934, p. 326-339.
215. SOUEGES, R., *La vie végétale*, Paris, Flammarion, 1949, 301 pages. (*Bibliothèque de philosophie scientifique*.)
216. SOULMAGNON, H., « Recherches sur les chlorures apportés au sol par l'atmosphère », *Annales du Service botanique et agronomique de Tunisie*, tome 6, Tunis, 1929, p. 163-174.
217. SOULMAGNON, H., CONSTANT et SCHEUR, « Recherches sur les chlorures apportés par l'atmosphère », *Annales du Service botanique et agronomique de Tunisie*, tome 10, 2^e mémoire, Tunis, 1933, p. 169-177.
218. TADROS, T. M., « The osmotic pressure of Egyptian desert plants in relation to water supply », *Bull. Fac. of Science*, n° 7, Le Caire, 1936, 35 pages.
219. TALLON, C., Lettre du 22 avril 1952, Arles-sur-Rhône (Réserve zoologique et botanique de Camargue), 2 pages dactylographiées.
220. TAMES, ALARCON C., « Los suelos salinos », *Agriculture*, n° 74, 1935, p. 87-90.
221. — « L'assainissement des terrains salins », *Fruits et primeurs de l'Afrique du Nord*, n° 89, Casablanca, 1938, p. 247-249.
222. — *Calculo del agua necesaria para el riego y empleo de aguas salinas*, Madrid, Public. del Ministerio de Agric., 1950, 152 pages.
223. — *Calculo del limite admisible para la salinidad en las aguas utilizables para el riego. Una comunicacion al II Congreso Nacional de Ingenieria*, Madrid, 1952, 2 pages.
224. TKATCHENKO, B., « Les sols solontchakoïdes de la Somalie française », *L'agronomie tropicale*, n° 7-8, Nogent-sur-Marne (France), juillet-août 1951, p. 341-369.
225. — *Végétation des différents sous-types de sols salés*, d'après Joffe, selon Vilenski, 1952, manuscrit, 2 pages dactylographiées.
226. TOPA, E., *La végétation des halophytes du nord de la Roumanie en connexion avec celle du reste du pays*, communication n° 70 de la Station internationale de géobotanique méditerranéenne et alpine de Montpellier, *Bull. Fac. Stiinte din Gernauti*, vol. 13, 1939, p. 59-80.
227. TRABUT, L., *La culture en terrains salés*, manuscrit communiqué par le Gouvernement général de l'Algérie, 6 pages dactylographiées.
228. TREITZ, P., « Preliminary report on the alkali land investigations of the Hungarian Great Plain for 1926 », *Proceedings and papers of the First International Congress of Soil Science*, Washington, 1927, p. 589-614.
229. TROCHAIN, J., « Contribution à l'étude de la végétation au Sénégal. La végétation des eaux saumâtres et salées et des sols salins temporairement submergés », *Mémoires de l'Institut français de l'Afrique noire*, n° 2, Paris, Librairie Larose, 1940, p. 106-138.
230. TSOMIS, J., *La culture du fenugrec en Grèce* [en grec], Ministère de l'Agriculture de Grèce, Direction des recherches agronomiques, 1948, 7 pages.
231. VASSEUR, A., « Observations sur l'utilisation des eaux salées au Maroc » *Bull. de la Société d'horticulture et d'acclimatation au Maroc*, n° 90, Casablanca, 1935, p. 177-183. (Paru également dans la *Revue agricole de l'Afrique du Nord*, Alger, 1937, p. 105-113.)
232. VERONA, O., « Osservazioni sulla microflora dei terreni salsi », *Bull. del R. Istituto Super. Agrar. de Pisa*, vol. 9, 1933, p. 240-247.
233. VINCENT, V., et HERVIAUX, J., « Le sodium dans les végétaux cultivés », *Annales de la science agronomique française et étrangère*, tome 46, n° 4, Paris, Éditions Berger-Levrault, 1929, p. 444-460.
234. VOLOBUEV, V. P., « Sur la régularité chimico-géographique du salage des sols de la plaine de Koura-Araks » [en russe], *Pedology*, n° 2, Moscou, février 1952, p. 117-123. (Analyse de G. Bryssine, Service de la recherche agronomique au Maroc, Rabat.)
235. WEBSTER, J. F., *Alkali lands in Irak*, Department of Agriculture (Mesopotamia), mémoire n° 5, 1921, p. 16.
236. WEBSTER, J. F., et VISNAWATH, *Further studies of alkali soils in Irak*, Department of Agriculture (Mesopotamia), mémoire, 1921, p. 16.
237. — *Report on the soil survey of the Dialah area*, Department of Agriculture (Mesopotamia), mémoire n° 2, 1921.
238. YANKOVITCH, L., « Expériences de cultures en bacs au Service botanique et agronomique », *Annales du Service botanique et agronomique de Tunisie*, tome 12-13, Tunis, 1935, p. 563-656.
239. — « Recherches d'une méthode d'étude de la résistance des plantes aux chlorures », *Annales du Service botanique et agronomique de Tunisie*, vol. 19, Tunis, 1946, 15 pages.
240. YANKOVITCH, L., « A partir de quelle teneur en NaCl une terre devient-elle salée ? », *C.R. de l'Académie d'agriculture*, Paris, 1946, p. 186-190.
241. — « Étude sur la résistance de certaines cultures d'été aux chlorures », *C.R. Conférence de pédologie, Montpellier-Alger, mai 1947*, Paris, Association française pour l'étude des sels, p. 416-419.
242. — « Résistance aux chlorures des plantes cultivées », *Annales du Service botanique et agronomique de Tunisie*, vol. 22, Tunis, 1949, p. 23-75.
243. — *Résultats obtenus au Service botanique et agronomique de Tunisie, concernant la résistance des plantes cultivées aux chlorures*, Note présentée au Congrès de l'A.P.A.S., Tunis, mai 1951, 7 pages dactylographiées (à l'impression).
244. ZIJLSTRA, K., « Over de Gevoeligheid van eenige Landbougewassen voor Zeewater » (Sensitiveness of some plants to sea water), *Centraal Instituut Landbouwkundig Onderzoek to Wageningen*, n° 52, (2) B, Rijkouitgeverij, La Haye, 1946, 27 pages.
245. ZUUR, A. J., « Ueber di Entzaltung von Salzböden im humiden niederlandischen Klima », *Transactions of the Third International Congress of Soil Science*, vol. I, Oxford, 1935, p. 409-412.

LA CROISSANCE DES PLANTES EN MILIEU SALIN

Étude fondée sur des recherches effectuées en Australie, en Inde et dans l'hémisphère occidental

par

H. E. HAYWARD

United States Salinity Laboratory, Riverside, California

INTRODUCTION

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. Étant 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 entièrement défaut, des conditions d'aridité ou de semi-aridité prédominent, et les sols tendent à devenir salins 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 autres matériaux analogues sous l'action des éléments atmosphériques, au cours du processus de formation du sol, mais il arrive parfois que les sels se soient accumulés quand la région était recouverte par un océan ou un lac salé [92, 96, 110]¹.

Les terrains salins se rencontrent aussi dans des zones côtières où ils ont été constitués par des marécages, et tiennent leurs sels de l'eau de mer qui les a recouverts et qui s'est évaporée dans des bassins ou des estuaires. Les terrains côtiers salins peuvent avoir, sur la croissance des plantes, une action semblable à celle qui résulte de l'aridité; 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 salins sont situés à proximité des embouchures ou des deltas de fleuves et reçoivent les sédiments fins qu'ils ont apportés. Ces terres de deltas peuvent devenir très fertiles et productives une fois débarrassées de leurs sels.

En général les terrains salins sont fertiles; quand on a éliminé les sels nocifs par des pratiques agricoles appropriées, ils peuvent se révéler excellents pour l'agriculture si l'on dispose d'assez d'eau de bonne qualité. C'est ce

qui s'est produit dans l'ouest des États-Unis, où l'expérience a montré que les terrains salins sont habituellement fertiles lorsqu'on les irrigue pour la première fois. Toutefois, si l'on continue à pratiquer l'agriculture d'irrigation, des carences d'éléments fertilisants apparaissent dans l'ordre suivant: azote, phosphore et potassium.

Le problème des sels 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 aussi 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 des sels peut être absorbée par les plantes cultivées; une partie peut s'accumuler à la surface du sol, sécher, et être éliminée par le vent; mais la proportion de sels enlevée de cette façon est faible, comparée aux quantités qui sont susceptibles d'être ajoutées si l'on emploie des eaux d'irrigations salées [51, 142]. De la sorte, lorsqu'on apporte plus de sels qu'on n'en retire, des sols légèrement salins peuvent le devenir fortement en raison d'un bilan des sels 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 vise à faire l'inventaire des recherches concernant les problèmes biologiques relatifs à la croissance des plantes en milieu salin ou alcalin. On trouvera, dans les sections qui suivent, la classification des sols salins et alcalins, ainsi qu'un exposé des relations entre la qualité de l'eau et la croissance des végétaux. La partie principale du rapport traitera

1. Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie, en fin d'article.

des recherches relatives à : a) la base physiologique de la tolérance aux sels et aux alcalis, b) l'effet exercé sur la croissance des plantes par des eaux et des sols salins et alcalins, c) la tolérance aux sels en ce qui concerne la germination, et d) la spécificité de la tolé-

rance aux sels. Dans la dernière section nous passerons en revue les sols salins ou alcalins qu'on rencontre en Australie, en Inde, dans l'hémisphère occidental et nous examinerons l'importance du problème de la salinité dans ces régions.

CLASSIFICATION DES SOLS SALINS ET ALCALINS

Bien que le but de ce rapport ne soit 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, il est néanmoins 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 les ouvrages de cet ordre, le U.S. Salinity Laboratory [230] a publié une terminologie et une description des sols salins et alcalins que Richards [187] a exposées à la réunion du Congrès international de la science du sol, tenue à Amsterdam. Les termes définis dans cette publication sont donnés ci-dessous :

Sol alcalin. Sol contenant assez de sodium libérable¹ 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) Les *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) Les *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.

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 :

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

Le degré de salinité ou teneur du sol en sels solubles 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 physiquement 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 Dairs et Bryan [46] et qui consiste à mesurer, dans une coupelle électrode standard, la résistance électrique de la pâte de sol saturé. 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 aux sels des plantes cultivées, Scofield [200] utilisait l'échelle de salinité suivante basée sur la conductivité électrique (millimhos par cm) de la solution extraite de la pâte de sol saturé :

0. Toutes les cultures prospèrent. Aucune trace d'attaque par les sels.
4. Les plantes sensibles végètent. Des halophytes peuvent prospérer.
8. Croissance des végétaux réduite. Rendement habituellement médiocre.
15. Seules quelques plantes survivent.

1. Quelques pédologues comprennent le potassium échangeable avec le sodium dans les considérations sur les sols alcalins [180, 206].

Cette échelle correspond à une tolérance moyenne aux sels. 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 elle est utilisée comme 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 CO₂, 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 juger de l'alcalinité du sol, le pH soit un critère aussi utilisable que le degré de saturation du sol par le sodium échangeable.

QUALITÉ 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

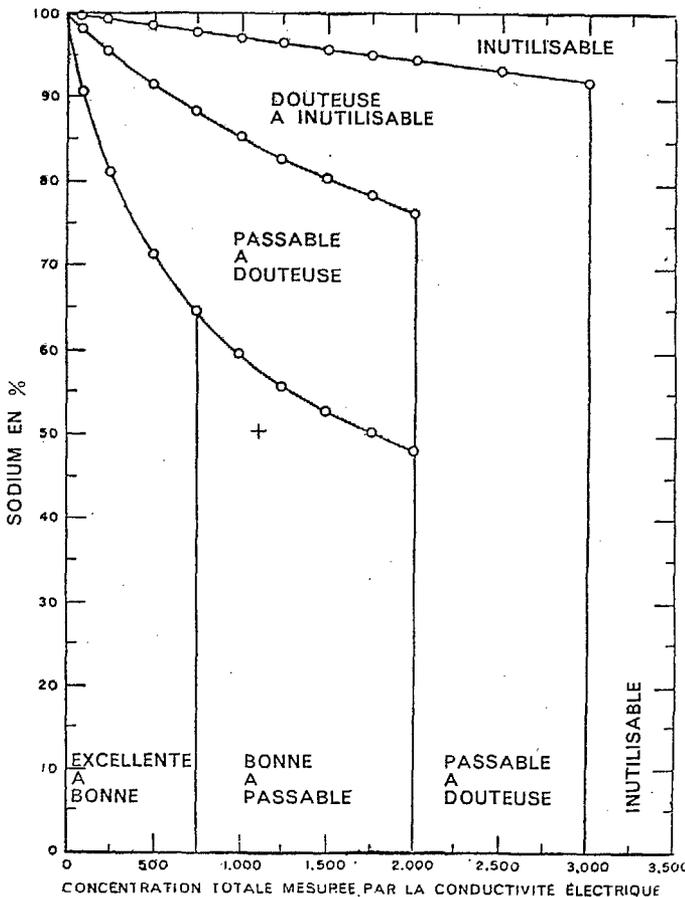


FIGURE 1. Diagramme servant à interpréter la qualité d'une eau d'irrigation (d'après Wilcox, U.S. Department of Agriculture [253]).

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 : a) les modifications défavorables des caractéristiques physiques du sol peuvent agir sur elle de façon défavorable ; b) à l'augmentation de pression osmotique des solutions du sol peut correspondre une diminution pour le végétal de l'humidité du sol physiologiquement utilisable ; c) l'accumulation de certains ions dans les solutions du sol peut avoir un effet spécifique sur l'activité physiologique de la plante.

Cassidy [40], Thorne, J.P., et Thorne, D.W. [226], Jensen en collaboration avec d'autres auteurs [117], Eaton [56], Wilcox et ses collaborateurs [253, 254] ont fait des recherches sur les caractéristiques chimiques de l'eau du sol et de l'eau de ruissellement en vue de déterminer les normes de qualité de l'eau d'irrigation.

Selon Wilcox, les principaux critères permettant de déterminer la qualité de l'eau sont les suivants : a) la concentration totale en sels dissous, b) le pourcentage de sodium, c) la concentration en bore. Comme on trouve moins fréquemment du 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 (fig. 1). Thorne, J.P., et Thorne, D.W. [226], en utilisant les mêmes critères, ont établi 25 catégories de qualité pour lesquelles la probabilité d'établissement des conditions d'alcalinité dans le sol est mise en relation avec le pourcentage de sodium.

Greene [79] utilise dans son système la concentration (en milliéquivalents par litre) et le pourcentage de sodium, mais n'établit pas de catégories d'eau distinctes. Il indique que de l'eau contenant plus de 30 milliéquivalents de sel par litre est habituellement impropre à l'irrigation, et déclare que le pourcentage 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; 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 n'ait guère d'inconvénients; mais quand la conductivité dépasse 3.000 micromhos par centimètre l'accumulation des sels a des chances d'être dangereuse [146, 230, 253]. La richesse en sels s'exprime aussi en milliéquivalents par litre, parties par million (p.p.m.) ou par le total de sel, pour une superficie et une profondeur d'eau déterminées.

Le second critère 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 qu'on rencontre des difficultés. Fireman et Magistad [61] déclarent que « la perméabilité diminue fortement quand la concentration en sels est réduite à la suite du filtrage par une eau riche en sodium », mais ils 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 aurait des effets défavorables. Il semblerait préférable d'indiquer une série de pourcentages ». Selon Wilcox [253] le maximum acceptable de sodium serait 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 dont la

teneur en sodium dépasse 60 % de la teneur totale en bases sont de qualité douteuse.

L'influence du bore sur la qualité de l'eau a été étudiée de très près 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 même les plus tolérantes d'entre elles sont en grand danger lorsqu'on utilise pour l'irrigation de l'eau contenant plus de 2 à 3 p.p.m. de bore [230, 253].

En 1894, Hilgard [110] et Loughridge [136] mirent en évidence 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] ont également reconnu l'importance des carbonates dans les eaux d'irrigation; récemment Eaton [56], Jensen [117], Fireman (en collaboration) [62], et Wilcox [253] ont attiré l'attention à nouveau sur cette question. Eaton étudie les carbonates et les bicarbonates dans les eaux d'irrigation de deux points de vue: a) la relation entre ces ions et la formation d'alcali noir; b) 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 l'eau fournie contient plus de carbonates et de 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 le « carbonate de sodium résiduel », et il propose de tenir compte dans les analyses d'eaux d'irrigation, du pourcentage de sodium « trouvé » et du pourcentage de sodium « possible », aussi bien que du carbonate de sodium résiduel¹.

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 la formule

$$\frac{\text{Na} \times 100}{\text{Na} + \text{Ca} + \text{Mg} - \text{CO}_2\text{H}}$$

où les concentrations sont exprimées en équivalents

BASES PHYSIOLOGIQUES DE LA TOLÉRANCE 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. Cela implique l'étude des bases physiologiques 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 aux sels comme la capacité qu'a une plante de subsister dans des conditions de salinité croissante. Par exemple, une espèce déterminée peut cesser presque ou complètement de croître quand le substratum devient fortement salin, mais survivre néanmoins. Dans ce cas, le pouvoir de survivre, indépendamment de toute croissance, dans un sol de plus en plus salin 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 [120, 196, 203, 213].

Deuxièmement, la tolérance au sel peut être considérée sur la base de la capacité de production d'une plante à un niveau déterminé de salinité. 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 salinité, 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 moyens de salinité n'est pas toujours capable de survivre lorsqu'il y a une plus forte 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 salinité du sol, par comparaison avec son comportement sur un sol analogue, mais non salin. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet plus facilement que les précédentes des comparaisons entre 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 sels, mais elle fournit une base plus utilitaire de sélection des plantes à cultiver sur des sols de salinité moyenne. Dans les essais de 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 salin, et n'en avoir pas moins la plus forte production de toutes les variétés essayées à un certain degré de salinité. Pour les besoins de l'agriculture, la méthode la plus recommandable paraît être la définition de la tolérance aux sels selon la production relative par comparaison avec un milieu non salin [11, 71].

Lorsqu'on étudie les raisons physiologiques des variations à la tolérance aux sels 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 est insuffisamment connue, et certains chercheurs ont confondu halophytisme et xérophytisme en raison du fait que les halophytes et les xérophytes ont la même adaptation anatomique et physiologique au manque d'eau. Schimper [197], par exemple, a conclu de ses observations qu'un accroissement de la teneur en sels des plantes augmente la pression osmotique de leur sève, et par conséquent leur capacité à absorber de l'eau. Toutefois, les recherches anatomiques de Chermeson [42] ont démontré qu'on doit 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], en utilisant une méthode indirecte de mesure de la pression osmotique, a relevé des valeurs atteignant 100 atmosphères pour des plantes poussant en sol sec ou très salin, tandis que celles qui poussent en sol humide non salin avaient des pressions osmotiques de 10 à 20 atmosphères. La pression osmotique, pour les diverses espèces, tendait à varier en même temps que la rareté physiologique de l'eau dans un milieu donné. Cela a été vérifié par Harris (en collaboration) [38, 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 et ses collaborateurs [91] ont observé des variations de 31,2 à 153 atmosphères pour la pression osmotique des liquides des feuilles d'*Atriplex confertifolia*, de 22,5 à 61,8 chez *Allenrolfea occidentalis*, de 22,7 à 39,8 chez *Sarcobatus vermiculatus*, et de 36,8 à 51,9 chez *Salicornia utahensis*.

Il a été relevé que ces variations de pression osmotique sont associées aux variations du taux des chlorures; toutefois Keller [123] a noté que certains halophytes peuvent régler la concentration de sel dans leurs liquides cellulaires indépendamment de la salinité

du milieu. Il a montré que les Salicornes peuvent contenir des concentrations de NaCl inférieures ou supérieures à celles qu'on trouve dans le sol suivant le degré de salinité. Iljin [114, 115] a insisté sur le rôle de l'ion sodium, et affirmé qu'on ne doit considérer comme halophytes que 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 : a) l'aptitude à créer des pressions osmotiques assez élevées, pour compenser l'accroissement de pression osmotique du substratum salin, b) la faculté d'accumuler des quantités considérables de sels dans les liquides cellulaires et de régler cette accumulation, c) 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 aux sels 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 atmosphères, et les pressions osmotiques des tissus cellulaires des sommités de luzerne étaient 12,3, 14,5, 17,9 et 19,9. L'accroissement du taux de chlorures dans les sommités de luzerne pouvait expliquer l'augmentation de pression osmotique des liquides cellulaires. En affectant le coefficient 100 à la production du terrain témoin (pression osmotique, 0,9 atmosphère), 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 sommités des plantes.

La luzerne est une des plantes cultivées les plus tolérantes aux sels, et les résultats ci-dessus font penser que sa tolérance est en relation avec : a) l'absorption de sels, b) l'accroissement de pression osmotique dans les liquides cellulaires, qui résulte de l'accroissement de la salinité du sol, c) 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 utilisé du trèfle rouge (*Trifolium pratense*) cultivé dans un sol irrigué avec une eau contenant 0, 2.500, 5.000, et 7.500 p.p.m. de sels 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 saline (7.500 p.p.m.) avait tué les plantes. Toutes les plantes irriguées avec de l'eau à 5.000 p.p.m. finirent par mourir, et un petit nombre seulement survécurent au traitement à 2.500 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. Cela donne à penser que la faculté qu'a une plante d'adapter sa pression osmotique interne peut ne pas être, dans tous les cas, un bon indice de la tolérance aux sels.

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

BASES PHYSIOLOGIQUES DE LA TOLÉRANCE AUX ALCALIS

On ne dispose que de peu de renseignements au sujet des bases physiologiques de la tolérance des plantes aux sols alcalins. Contrairement à ce qui se passe pour les sols salins, il y a, en ce qui concerne la résistance aux alcalis, des variations considérables parmi les halophytes. Hilgard [110] fait remarquer que *Allenrolfea occidentalis* et *Salicornia subterminalis* sont deux des halophytes les plus tolérants aux sels, mais qu'ils ont une tolérance relativement médiocre à l'« alcali noir » (alcali). Toutefois, *Sarcobatus vermiculatus* et *Sporobolus airoides*, tolérants aux sels, 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 sol 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]. Celui-ci 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 du collet 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, qu'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 CO_2 soluble. Breazeale et McGeorge [33] ont montré que la présence de Na échangeable est fréquemment associée à des valeurs élevées du pH du sol, et McGeorge [139] indique que cette situation provoque des désordres physiologiques chez les agrumes. Des analyses du sol ont mis en évidence une augmentation du pH du sol sous les arbres atteints ; les feuilles et les fruits des arbres ayant poussé dans un sol alcalin calcaire avaient moins de Ca et plus d'alcalinité soluble à l'eau. Toutefois, Breazeale [32] a étudié la toxicité des sols à alcali noir, et conclu que, dans la plupart des cas, CO_2Na_2 s'y trouve en quantité suffisante pour être toxique. Il attribue l'infertilité 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 mis en évidence l'influence favorable du Ca, et Ratner [182] a prouvé que la croissance des plantes est inhibée dans les sols riches en Na, faute de quantités suffisantes de 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 l'altération du régime de calcium, et en particulier une insuffisance de ce métal 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 des racines dans l'amélioration des 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 constaté que les plantes sont incapables de tirer du Ca de tchernozioms saturés de Na à 50 % et que, pour une plus forte saturation de Na, les plantes en croissance abandonnent du Ca au sol et absorbent du Na en échange.

Puri [180] a découvert que le traitement au CaCl_2

et le lessivage 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 accru la production de 35 à 1.100 kg à l'hectare. Gedroix [77] a fait des expériences sur l'avoine, le sarrasin, et la moutarde dans des sols saturés de diverses bases, où figure l'ion Na, et il 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 constaté que la production diminue lorsque le taux du Na échangeable dépasse 40 % de la capacité d'échange de l'argile, et que le plus fort taux de Na toléré par les plantes se situe entre 60 et 70 % de la capacité totale d'échange. La proportion de Na dans les plantes augmente et celle de Ca diminue à mesure que croît la proportion 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 est défavorablement affectée par un pourcentage de sodium échangeable de 26 et arrêtée lorsque ce pourcentage atteint 51. L'accumulation de Ca, Mg, et K dans les sommités des plantes diminue à mesure qu'on augmente 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 du haricot rouge nain, des betteraves potagères, *Chloris gayana*, et *Paspalum dilatatum*, et sur l'accumulation des cations dans ces espèces. 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. Les six taux de Na échangeable appliqués étaient : 0, 15, 30, 45, 60 et 75 % de la capacité d'échange en cations. Le reste de la capacité d'échange en cations était saturé par Ca et Mg, le rapport Ca/Mg étant 3/1. Le pH de toutes les cultures était approximativement 6,5. On a constaté 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* et les betteraves potagères se sont révélés très tolérants au sel, et des réductions marquées de croissance ne se sont produites que pour les taux de Na les plus élevés qu'on ait employés. On a déterminé à la récolte le taux de Ca, Mg, K et Na, pour chaque espèce, dans les racines et les sommités et constaté 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 som-

mités. 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, et les espèces les plus sensibles, celles qui tendent normalement 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 : a) l'augmentation de pression osmotique de la solution du sol qui entraîne une diminution concomitante de la disponibilité physiologique en eau pour la plante ; b) 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'HUMIDITÉ 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. Magstad [144] a fait le bilan des travaux effectués sur ce sujet, et il a étudié avec ses collaborateurs [145] les réactions de plusieurs plantes cultivées sur sable lorsque d'assez fortes quantités 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 atmosphères. Dans la plupart des cas, ils ont observé que la diminution de la croissance est fonction linéaire des concentrations osmotiques croissantes du sous-sol, et que la réduction est en grande partie indépendante de la nature des sels ajoutés, chlorures ou sulfates, pourvu qu'ils soient fournis sur la base d'une même pression osmotique (fig. 2). Toutefois pour certaines plantes, les sels de Cl sont légèrement plus toxiques que SO_4 à même concentration.

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 diminution de croissance, correspondant à des concentrations accrues dans le sous-sol, et aussi quelques effets toxiques attribuables aux ions Cl et SO. Toutefois il n'a pu relever de taux précis

à partir duquel les effets toxiques deviendraient prononcés, et il conclut que « la limite de tolérance d'une plante semble être une notion insaisissable, car le processus graduel qui aboutit à la mort correspond non pas à un taux de concentration déterminé, mais à toute une gamme de concentrations et, par des jours particulièrement chauds, les plantes cultivées sur des solutions salines peuvent mourir rapidement ».

Gauch 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 atmosphères. Ils ont constaté que la diminution de croissance est fonction linéaire des augmentations

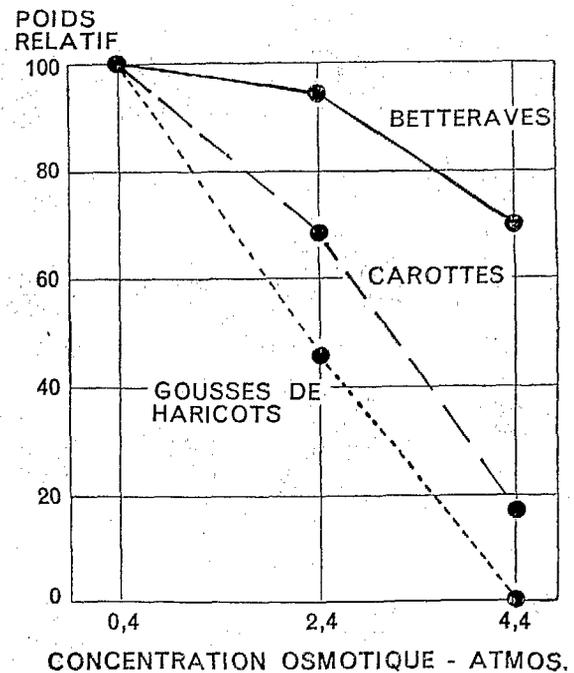


FIGURE 2. Effet différentiel des variations de concentration des solutions de culture sur la croissance de plusieurs plantes (d'après Magstad, en collaboration avec d'autres auteurs [145]).

de pression osmotique du sous-sol et qu'il n'importe pas, à cet égard, qu'une pression osmotique donnée soit obtenue par addition de NaCl, de CaCl₂, ou de SO₄Na₂. Les sels de magnésium ont un effet toxique qui s'ajoute à celui qui peut 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 1,096 % de sels solubles dans l'eau. Il y a eu une diminution graduelle de la récolte pour des concen-

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], en utilisant des racines adhérentes d'*Allium cepa*, a découvert que les sous-sols de pression osmotique de 4,2 à 5,7 atmosphères « représentent la gamme des concentrations critiques de sucrose et de NO₃K qui

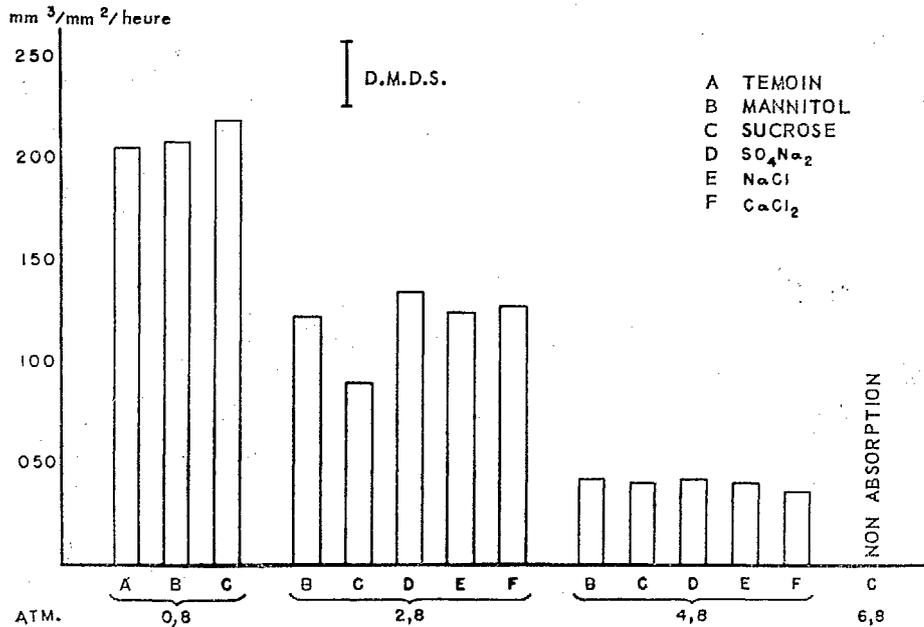


FIGURE 3. Comparaison du taux moyen d'entrée de l'eau pour des racines individuelles dans des sous-sols organiques et inorganiques à des pressions isosmotiques.

Différence minimum de signification (D.M.D.S.) résultant de la moyenne des erreurs = 0,0327 pour une valeur de 5 %.

(D'après Hayward et Spurr [98].)

trations de sels de plus en plus fortes; et, dans les conditions de leur expérience, la limite supérieure permettant 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 observé que la luzerne est plus tolérante aux sels que l'avoine ou le blé.

Les études de Gauch 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 atmosphères. Le rendement relatif est passé de 100 % (témoin) à 54 % pour 4,5 atmosphères, le taux de réduction de la production étant d'environ 10 % pour chaque accroissement de pression osmotique de 1 atmosphère. D'autres études concernant l'action des sous-sols salins sur la croissance des végétaux ont été publiées

compensent les facteurs internes déterminant 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 atmosphères. 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 atmosphères. Hayward et Spurr [98] ont fixé des potomètres à des racines intactes de maïs et mesuré le taux d'entrée de l'eau en liaison avec les pressions osmotiques du sous-sol qui s'échelonnaient entre 0,8 et 6,7 atmosphères. Ils ont observé que ce taux est inversement proportionnel à la pression osmotique et pratiquement indépendant du fait que l'accroissement de pression osmotique est créé par NaCl, CaCl₂, SO₄Na₂, le saccharose ou le mannitol. L'entrée d'eau cesse quand la pression osmotique du sous-sol est maintenue à 6,8 atmosphères (fig. 3).

Eaton [54] et Long [135], en 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 reposaient sur l'emploi de techniques de culture en milieu aqueux où la pression osmotique du sous-sol peut 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 pluie ou d'irrigation 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.

En utilisant des terrains salés uniformément à 0,2 % (sur la base du sol sec) et ensuite irrigués par sillons, ils ont constaté 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 sels et la diminution de l'eau dans la zone des racines.

Wadleigh et Ayers [238] ont proposé la notion de *total soil moisture stress* (charge 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;

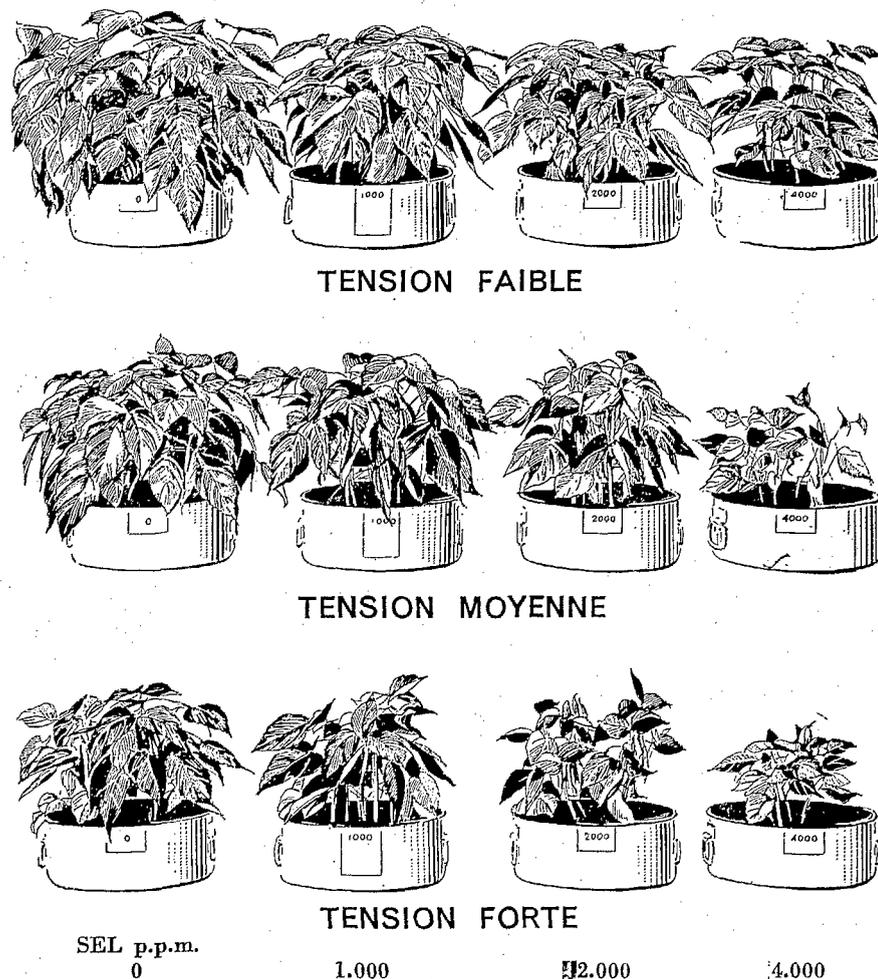


FIGURE 4. Croissance des haricots pour quatre doses de sel et trois tensions d'humidité (d'après Ayers et ses collaborateurs [14]).

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 moment donné; et e) la variation dans 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 au champ est d'environ 1/10 à 1/3 d'atmosphère, et Richards et Weaver [189, 190] ont découvert que la croissance de la plupart des plantes cesse quand la tension d'humidité du sol atteint environ 15 atmosphères, ce qui correspond approximativement au « point de flétrissement permanent ». A la suite de nombreuses études, Veihmeyer et Hendrickson [106, 107, 234, 235] ont conclu que la « gamme disponible » d'humidité du sol est limitée par la « capacité de rétention au champ » et le « point de flétrissement permanent »; ils considèrent que, dans ces limites, l'humidité du sol est « également disponible » pour la plante au champ dans un sol non salin. C'est là une notion utile, mais l'humidité retenue hors de la plante par une force de 15 atmosphères n'est pas aussi facilement disponible que celle qui est retenue par une force de 1/3 d'atmosphère seulement. Dans la plupart des sols, l'eau disponible est absorbée du sol avant que la tension d'humidité atteigne 2 ou 3 atmosphères [100, 147, 237]. Les relations entre l'humidité du sol et la croissance des plantes — notamment celles que nous avons abordées ci-dessus — ont été examinées dans une étude critique de Richards et Wadleigh [188].

Comme il a été dit ci-dessus, la charge totale d'humidité du sol est fonction de la salinité, ce qui conduit à une relation intéressante avec la croissance et le degré de tolérance aux sels des végétaux. Wadleigh et Gauch [244] ont observé que le développement des feuilles de coton s'arrête lorsque la charge totale d'humidité d'un sol salin atteint environ 15 atmosphères et que le taux quotidien de croissance des feuilles est fonction de cette charge. Toutefois la charge d'humidité qui détermine des symptômes marqués de carence en eau n'est pas la même pour toutes les espèces [247]. Wadleigh et son équipe [238, 246] ont observé que la croissance végétative des haricots et du guayule (*Parthenium argentatum*) — lorsque d'autres facteurs ne la limitent pas — est en relation assez étroite avec la charge d'humidité moyenne, que celle-ci soit 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 un sol additionné de NaCl à 0, 1.000, 2.000 et 4.000 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 diminuèrent à mesure qu'augmentait la tension d'humidité du sol au moment des arrosages, et aussi à la suite de l'addition progressive de NaCl au sol. La diminution de croissance la plus prononcée fut produite par un traitement

combinant une forte tension d'humidité et une teneur élevée en sel et provoquant par conséquent une charge d'humidité totale élevée (fig. 4).

En résumé, il est évident que l'un des principaux effets de taux moyens de salinité du sol est de limiter l'apport d'eau aux plantes en augmentant la pression osmotique de la solution du sol. Cet effet est renforcé par une augmentation de la tension d'humidité du sol et l'action combinée de ces deux facteurs, c'est-à-dire la charge totale d'humidité, conditionne la croissance des plantes. Ainsi, un sol peut devenir assez salin pour empêcher la croissance des halophytes eux-mêmes tout comme il peut devenir trop sec pour permettre la croissance des xérophytes; dans certaines conditions, la salinité et la sécheresse se combinent pour limiter la croissance de la plante.

EFFETS TOXIQUES D'IONS DÉTERMINÉS

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 salines 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. Magistad [144], Mibashan [154], ainsi qu'Hayward et Wadleigh [100], ont fait l'inventaire des travaux consacrés aux effets toxiques des ions sur la croissance. Les ions qui peuvent s'accumuler dans les sols salins sont : Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Cl^- , SO_4^- , CO_3H^- et NO_3^- .

SODIUM

Bertrand [24] affirme que Na est toujours présent dans les tissus végétaux, mais parfois en quantités inférieures à 0,1 g par kilo de matière sèche. Cependant il apparaît que certaines plantes accumulent le sodium tandis que d'autres ont tendance à l'éliminer.

En se fondant sur l'analyse de 77 espèces de plantes indigènes de New Jersey et de 24 variétés de plantes cultivées, Wallace et ses collaborateurs [249] ont découvert que la teneur en Na des espèces indigènes varie de 0,00 à 2,04 % (poids sec), et les variétés cultivées de 0,00 à 3,00 %. Collander a trouvé [43] que la plupart des halophytes sont très riches en Na, tandis que le sarrasin, le maïs et le soleil se distinguent par l'absence presque complète de Na. Hayward et ses collaborateurs [95] ont noté que les racines de pêcher peuvent accumuler dix fois la quantité de Na qu'on trouve dans les feuilles et les branches, avec des valeurs de 0,36 % dans les petites racines; de leur côté, 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 celle-ci coïncide avec l'accumulation d'anions provenant du sous-sol, mais il ne semble pas qu'on doive classer ces cas comme relevant de la toxicité du sodium.

On ne dispose que de 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 sels ni en Na, et le symptôme observé pourrait bien révéler l'alcalinité plutôt que la salinité du sol. 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 lésions attribuées à Na étaient des taches nécrosées ou écorchées près de la marge ou sur la partie centrale de la feuille, tandis que dans le cas de détériorations dues 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 allant jusqu'à créer un déséquilibre cationique (Ratner [182, 183]).

CALCIUM

L'ion Ca peut être toxique quand il s'accumule dans les solutions salines du sol et y atteint une forte concentration, mais sa toxicité varie avec les espèces végétales. Par exemple, Wadleigh et Gauch [243] ont montré que le guayule tolère relativement mieux une salinité du sous-sol due à CaCl_2 qu'une salinité due à d'autres sels neutres. De son côté, Masaewa [151] affirme que, dans le cas de cultures de lin sur sol, des applications de CaCl_2 sont plus toxiques que des applications de NaCl. Étant donné que, dans le cas de cultures additionnées de CaCl_2 , l'ion Cl s'accumulait aux niveaux supérieurs des plantes et que Ca était lui aussi présent en grandes quantités, Masaewa a attribué 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 ils 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 NO_3 . Comme l'addition de $(\text{NO}_3)_2\text{Ca}$ ne provoqua qu'une faible accumulation de Cl, ils conclurent que la toxicité de Cl n'était pas en cause. Lehr [132], dans ses recherches sur l'importance du sodium dans la nutrition des plantes, a noté que la présence de Ca en quantités relativement fortes exerce un effet très nuisible sur la production des feuilles et des racines chez la betterave fourragère. La plante traitée au calcium est caractérisée

par une couleur bleu vert et une croissance rabougrie troubles qui peuvent être supprimés par l'absorption de Na.

Gauch et Wadleigh [72, 242] ont étudié l'absorption des éléments nutritifs par les haricots rouges nains cultivés sur des sous-sols salins. Ils ont utilisé deux séries de cultures en solutions aérées, une série à laquelle on ajoutait NaCl, l'autre CaCl_2 . En plus de la culture nutritive de base (de pression osmotique 0,5 atmosphères) ils ont ajouté à la solution nutritive de base, dans chaque série, quatre doses de sels de pressions osmotiques de 1, 2, 3, et 4 atmosphères. Ils ont constaté que les plantes des séries à CaCl_2 avaient une croissance moins rapide que celles des séries à NaCl et attribué cette différence surtout à une croissance plus faible des racines dans les séries à CaCl_2 . Les plantes à NaCl, où Na prédominait dans les racines, absorbaient au total de plus fortes quantités de N, P, et K que les plantes à CaCl_2 . Ils suggèrent que l'action différentielle des ions Na^+ et Ca^{++} sur l'hydratation des colloïdes peut entrer en ligne de compte, et que l'antagonisme des effets de Na et de Ca sur la perméabilité des cellules aux sels peut être un facteur de première importance pour expliquer les résultats obtenus.

MAGNÉSIUM

Il a été reconnu que de fortes accumulations de Mg dans le sous-sol sont toxiques pour les plantes, indépendamment de toute inhibition liée à la pression osmotique (Sigmond [207], Trelease, S.F., et Trelease, H.M. [228], et Wadleigh et Gauch [243]). Ces derniers ont constaté que le guayule est tué quand on ajoute à une solution nutritive assez de MgCl_2 pour produire une pression osmotique de 1 atmosphère, tandis que, dans des conditions semblables, les haricots rouges accusent une réduction de croissance d'environ 10 % seulement. Trelease, S.F., et Trelease, H.M. [228] déclarent que les dégâts causés au blé par le Mg varient surtout en fonction du rapport Mg/Ca, bien que d'autres produits chimiques puissent intervenir; Gauch [70] associe 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 il cite les résultats obtenus par des chercheurs russes, selon lesquels il n'y a pas de diminution de rendement lorsque Mg constitue 50 à 60 % de la capacité d'échange en cations, alors qu'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. En l'occurrence, il est peu probable qu'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 par carence de fer (Walsh et Clarke [250]). Boynton et Burrell [30] ont signalé des taches sur les feuilles du pommier dues à une carence en Mg et les ont attribuées à l'effet antagoniste d'une forte teneur en K à la surface des racines ou dans l'arbre. Selon Miyake [158], « 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 dans diverses paires de cations, par exemple entre Ca^{++} et Mg^{++} , et entre des cations monovalents et divalents (Lundegardh [137]). La question de l'antagonisme sort du cadre du présent rapport, 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 ceux-ci ont eu parfois tendance à assimiler la toxicité du Cl à l'effet défavorable d'une forte salinité du sol. Le fait est que, pour de nombreuses espèces, on a observé que les sels de Cl n'arrêtaient 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 sont plus sensibles à Cl qu'à SO_4 à pression osmotique égale, tandis que les tomates et les betteraves à sucre ont une meilleure tolérance à Cl. Harper [83] signale que le pacanier est gravement endommagé quand la teneur en Cl des feuilles dépasse 0,6 % et il a observé des lésions des feuilles de pacanier, d'orme et d'hickory quand la dose de Cl du sol sec dans la zone des racines dépasse 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, le 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 rarement à des concentrations inférieures à 0,7 % de Cl, et les feuilles les plus atteintes avaient habituellement une concentration d'environ 2,0 %.

Hayward et ses collaborateurs [95] ont découvert, à la suite d'une étude de cinq ans sur le pêcher, que, à pression osmotique égale, les solutions chlorurées réduisent davantage la croissance des végétaux et sont 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 Ravi-kovitch 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] dans leurs recherches sur le tabac ont étudié le mécanisme de 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 constaté une réduction prononcée de la teneur des feuilles en acide malique et également noté que l'activité amylolytique normale est troublée et que les feuilles se gorgent 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 a une augmentation du rapport amidon-sucre. Selon Schuphan [198], il n'est pas possible de généraliser l'effet du Cl sur le métabolisme des hydrates de carbone car les espèces réagissent de façon très diverse à l'ion Cl.

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 de symptômes spécifiques de lésion [13, 55]. Dans ce cas, il peut y avoir une réduction de la taille des feuilles ainsi que 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, une forte accumulation de Cl tend à augmenter l'épaisseur et la succulence des feuilles [93, 232, 255]. Boyce [29] a étudié l'hypertrophie provoquée par le sel chez les plantes des dunes et découvert qu'elle est liée à la tolérance de la plante au sel qui, pulvérisé sur les feuilles, y forme d'importants dépôts. Quand elles sont soumises à de fortes concentrations de sel, les espèces les plus tolérantes se caractérisent par une plus grande succulence et la capacité d'accroître l'épaisseur du mésophylle.

Dans de nombreux cas, on peut observer des lésions ou perturbations imputables au Cl. La plus commune 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 deux tiers de la feuille et, dans certains cas, sa surface entière. Ceci peut être précédé par un début de chlorose et de jaunissement de la feuille. Dans le cas de brûlures graves, la feuille tombe. 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 relevé qu'à concentration osmotique égale, SO_4Na_2 inhibe davantage la production de graines de lin que NaCl ou CaCl_2 ; Wadleigh et ses collaborateurs [246] rendent compte de résultats semblables pour la guayule (*Parthenium argentatum*). Eaton [55] indique qu'en milliéquivalents, SO_4 paraît être moitié moins toxique que Cl pour certaines plantes. Haas et Thomas [81] ont observé des marbrures jaunes ou bronzées sur les feuilles de citronnier, quelques brûlures et une chute accentuée des feuilles quand il y avait une concentration importante de SO_4 dans la solution du sol.

Harris et ses collaborateurs [89, 90] ont noté des différences variétales en ce qui concerne l'accumulation des ions Cl et SO_4 dans les liquides cellulaires des feuilles de coton. Les variétés égyptiennes de coton ont tendance à accumuler beaucoup plus de Cl dans leurs tissus que les variétés américaines des plateaux, et la même tendance a été observée en ce qui concerne SO_4 . Lyon [138], au cours de ses travaux sur deux races de tomates et sur la génération F_1 , a constaté que la race Red Currant est moins touchée par de fortes concentrations de SO_4Na_2 que les deux autres en ce qui concerne le poids sec des racines, le poids frais de fruits et le poids moyen des fruits mûrs.

Bien qu'on n'ait que des renseignements fragmentaires sur les raisons pour lesquelles l'ion SO_4 a des effets inhibiteurs sur la croissance de certaines espèces, il est évident que de fortes concentrations de SO_4 peuvent limiter l'activité de l'ion Ca dont dépend l'absorption cationique de la plante. Des analyses de feuilles de haricot [74], de pêcher [95] et de *Dactylis glomerata* [245] ont montré que les tissus contiennent moins de Ca et plus de Na et de K lorsque SO_4 est l'anion prédominant dans le sous-sol que lorsque c'est Cl . Ces résultats font penser que les effets spécifiques défavorables de SO_4 peuvent être dus à la rupture de l'équilibre cationique de la plante.

BICARBONATES

On pense que l'ion CO_3H est très toxique pour les plantes, mais il est fort difficile de le vérifier en raison des relations entre l'ion CO_3 et le pH. Breazeale [32] déclare que CO_3HNa se trouve rarement en concen-

trations toxiques dans les sols alcalins et que sa toxicité exprimée par rapport à Na est à peu près la moitié de celle de CO_3Na_2 . Heller et ses collaborateurs [104] ont étudié des tomates cultivées sur sable en utilisant NaCl et CO_3HNa en concentrations de 100 à 3.000 p.p.m. Les résultats qu'ils ont obtenus indiquent que CO_3HNa est plus toxique que NaCl , et qu'il provoque une inhibition très nette de l'absorption de Ca par les plantes. Harley et Lindner [82] ont indiqué que des vergers de pommiers irrigués avec de l'eau relativement riche en CO_3H ont tendance à devenir chlorotiques; ils ont signalé que la situation peut être améliorée en irriguant ensuite avec de l'eau pauvre en CO_3H . Ils ont montré une forte incrustation de CO_3Ca et CO_3Mg sur les racines des arbres des vergers qui avaient été irrigués pendant un certain temps avec de l'eau riche en bicarbonates de Ca et Mg . Ces dépôts peuvent produire, pensent-ils, 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 CO_3H dans leurs études sur deux graminées, *Chloris gayana* et *Paspalum dilatatum*. L'addition à une solution nutritive de 12 milliéquivalents par litre de CO_3H 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 CO_3H sur les haricots rouges nains et sur les betteraves rouges potagères, en utilisant des solutions nutritives auxquelles ils avaient ajouté 8, 16 et 32 milliéquivalents/litre de CO_3HNa . Toutes les solutions étaient préparées au pH 8,0. Les résultats obtenus montrent la différence des réactions à CO_3H d'une espèce à l'autre. Chez les haricots, les fortes concentrations de CO_3H entraînaient une inhibition marquée de la croissance et une chlorose prononcée. Les traitements amenèrent 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 CO_3H que celle de nombreuses espèces étudiées. Des doses croissantes de CO_3H 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 bétanine. Il y avait une accumulation très nette de Na et d'oxalate.

Steward et Preston [212] ont étudié l'action de l'ion CO_3H sur l'absorption du bromure et le métabolisme en utilisant des rondelles de pomme de terre dans des solutions aérées. A pH constant, l'augmentation de la concentration externe de CO_3HK diminuait à la fois la synthèse des protéines et l'accumulation de bromure. Des preuves indirectes ont montré que CO_3HK diminue aussi la respiration et le métabolisme des hydrates de carbone. Les études citées montrent que l'effet défavorable de CO_3H 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 CO_2H suivant les espèces végétales.

NITRATES

L'ion 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]. Kelley [125], qui a passé en revue les théories concernant la formation de ces dépôts, déclare qu'« aucune explication vraiment satisfaisante n'a été donnée jusqu'à présent de l'origine d'énormes dépôts de nitrates au Chili ou en d'autres endroits ». Larson [130] a décrit un sol à salinité alcaline dans la vallée de Yakima (État de Washington), dans lequel NO_3 constitue 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 d'établir une distinction nette entre un effet spécifique de l'ion NO_3 et les effets concomitants produits par la pression osmotique du sous-sol ou par les cations complémentaires, mais on connaît plusieurs exemples d'inhibition de croissance

produite par des taux élevés de NO_3 . Chapman et Liebig [41] ont constaté que la croissance des plantules d'orange est considérablement ralentie dans des solutions contenant 840 p.p.m. d'azote nitrique. Leonard et ses collaborateurs [133] ont utilisé des solutions nutritives contenant 10 à 1.600 p.p.m. d'azote. Ils ont signalé que les feuilles de la patate douce prennent une couleur vert foncé et que quelques-unes d'entre elles tombent lorsqu'on applique la solution à 200 p.p.m. Avec la solution à 300 p.p.m., et surtout avec celle à 1.600 p.p.m., les feuilles produites sont devenues chlorotiques, et les plantes soumises à ce traitement sont mortes avant la fin de l'expérience. Le poids frais de l'appareil végétatif, racines comprises, diminue 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'azote allant de 14 à 396 p.p.m. et constaté que de fortes concentrations de NO_3 réduisent la croissance végétative et le nombre de capsules formées. Les plantes cultivées aux taux d'azote le plus élevé étaient moins grandes d'environ 25 % que celles qui avaient été cultivées aux taux intermédiaires (56 et 224 p.p.m.). L'observation ancienne de Headon [101], selon laquelle l'accumulation de NO_3 dans le sol provoque la production de betteraves à sucre de qualité inférieure à cause d'une faible teneur en sucre, a été vérifiée à maintes reprises.

TOLÉRANCE AUX SELS ET GERMINATION

La capacité qu'ont une espèce ou une variété végétales données de germer et d'établir leur plantule est souvent le facteur limitatif en matière de production agricole ; en milieu salin, cette phase du cycle vital de la plante peut être la phase critique. Les eaux et les sols salins peuvent agir de deux façons sur la germination : a) il peut y avoir assez de sels 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 ; b) 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 ils soulignent que, dès 1896, des chercheurs du Wyoming et d'ailleurs ont étudié l'action d'une forte pression osmotique de la solution du sol [34, 35, 208, 214]. Ces études ont montré que la germination est retardée par les sels en solution et que l'importance du retard de la germination et des dommages aux graines et plantules est 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 il a été noté que les diverses espèces de plantes agricoles montrent des tolérances aux sels différentes pour une concentration saline déterminée. Stewart [214] a remarqué que les céréales ont une tolérance aux sels supérieure à celle des légumineuses, et il a établi le classement suivant, par ordre de tolérance décroissante aux sels : orge, seigle, blé, avoine. Pour les légumineuses, il donne l'ordre de tolérance suivant : pois, trèfle rouge, luzerne, trèfle blanc. Harris [84] a fait des essais de germination sur un grand nombre de plantes cultivées à des concentrations de sels allant de zéro à 10.000 p.p.m. (1 % du poids sec), en utilisant plusieurs sels, isolément ou par groupes. Il a relevé de grandes différences entre les plantes, en ce qui concerne la germination sur sous-sol salin, et établi une liste des plantes étudiées dans l'ordre de tolérance décroissant 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] a recouru à une méthode de culture sur sable, en essayant successivement les différents sels, pour étudier la germination des haricots et du maïs à des pressions osmotiques de 0,5 à 8,0 atmosphères et il a conclu 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, en utilisant un seul sel, à des pressions osmotiques allant jusqu'à 7 atmosphères. Sauf dans le cas de quelques-unes des solutions les plus faibles, la germination et la croissance des racines diminuaient à mesure qu'augmentait la concentration des sels. Millington et ses collaborateurs [155] ont procédé, en Australie-Occidentale, à 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 c'est le seigle qui germe le mieux aux plus hauts degrés de salinité, mais qu'il a une tolérance relativement médiocre aux stades ultérieurs de sa croissance et de son développement. Les orges fourragères montrent 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 qui conditionne la germination des graines sur le terrain est difficile, car l'humidité du sol et la concentration en sels changent continuellement par suite 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 : elle 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 déterminés. On détermine le taux d'humidité du sol et la richesse en sels 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 pesées ; 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 [48, 113].

Ayers et Hayward [9, 12] ont utilisé cette technique pour étudier la luzerne, l'orge, le haricot rouge, le maïs, l'oignon et la betterave à sucre à des taux de salinité allant de 0,05 à 0,4 % sur 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 atmosphères. Aucune graine n'a germé au taux de 0,4 %, mais pour l'orge (California Marriouitt) on a obtenu 80 % de germination au taux de 0,3 % de sel (pression osmotique de 20 atmosphères). On a eu avec la luzerne 80 % de germination avec 0,1 % de sels ajoutés (pression osmotique de 7,3 atmosphères), mais la germination de la betterave à sucre a été réduite de 50 % au taux de sel de 0,08 % (pression osmotique de 5,8 atmosphères) [fig. 5].

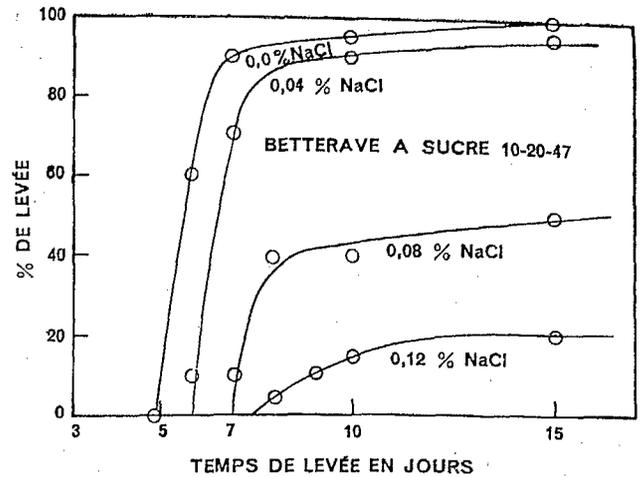


FIGURE 5. Effet de l'addition de NaCl sur la germination des graines de betterave à sucre (d'après Ayers [9]).

Le maïs, qui, aux stades ultérieurs de sa croissance, est moins tolérant que la betterave à sucre ou la luzerne, donna une germination satisfaisante (93 %) pour une pression osmotique de 10 atmosphères. Cela permet de penser qu'il peut ne pas y avoir de corrélation positive entre la tolérance 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 sont les plus toxiques, que ceux de SO_4 sont les moins toxiques, et que ceux de CO_3 occupent une position intermédiaire ; mais ils ont aussi montré que la toxicité de NaCl et SO_4Na_2 semble dépendre de la concentration du sel et du pourcentage d'humidité existant, alors que la toxicité de CO_3Na_2 est plus largement influencée par la présence de matière organique. Harris [84] a relevé que la toxicité relative des sels solubles s'établit dans l'ordre décroissant suivant : NaCl, $CaCl_2$, KCl, $MgCl_2$, NO_3K , $(NO_3)_2Mg$, CO_3Na_2 , SO_4Na_2 et SO_4Mg . En ce qui concerne les antagonismes, il conclut que l'effet de sels mélangés n'est pas aussi grand dans le sol que dans les cultures sur solutions. Stewart [214] a trouvé que les carbonates basiques sont les sels les plus toxiques, et signalé que SO_4Na_2 est 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, 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 vingt-quatre heures ne survivaient plus quand on les remettait ensuite dans l'eau ». Ils ont constaté que le maïs est le plus résistant en solutions pures, et le coton le moins résistant, et noté que, sous le rapport

de la toxicité, il peut y avoir de grandes différences entre les espèces végétales, même lorsqu'elles appartiennent à la même famille. La présence d'un excès de SO_4Ca diminue considérablement la toxicité des sels de Mg et Na. Rudolfs [194] a étudié la germination de graines de dix espèces différentes, préalablement trempées et soumises ensuite à des sels employés seuls. Toutes les graines étaient gravement endommagées dans les solutions de CO_3K_2 , et des anomalies se produisaient lorsqu'on utilisait ce sel ou SO_4Mg . $(\text{NO}_3)_2\text{Ca}$ avait un effet défavorable sur la germination et le développement de la radicule 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 atmosphères de pression osmotique. Elle a découvert que la germination est à peu près arrêtée par des concentrations de 12 à 15 atmosphères et que la réduction et le retard de germination sont plus marqués sur les sous-sols à NaCl que sur ceux à mannitol. Cette différence de réaction faisait penser à un effet toxique de NaCl, et les résultats obtenus par Uhvits indiquent que, pour de fortes concentrations, les valeurs totales d'absorption sont 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 atmosphères. L'étude du processus de guérison chez les plantes a fourni des preuves supplémentaires de la toxicité du chlore. Des graines transportées d'un sous-sol de NaCl à 12 atmosphères dans l'eau du robinet ont eu un rétablissement beaucoup plus rapide que celles qui avaient été transportées après le même temps du bain de NaCl à 15 atmosphères. Le pourcentage de graines défectueuses était plus fort sur le sous-sol de NaCl à 15 atmosphères que sur celui à 12 atmosphères, 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 relevé qu'une augmentation légèrement inférieure à 3° C de la température moyenne de la serre diminuait le pourcentage de germination pour toutes les concentrations du traitement au sel, les différences étant plus sensibles 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 sous-sols contenant de 306 à 11.200 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 32° C, pratiquement aucune germination ne se produisait, quel que fût le taux de sel ; mais à 13° C, 47,7 % des graines de *Trifolium fragiferum* et 38 % des graines de luzerne germaient. Dans son étude sur l'action de solutions de chlore sur le soja à hautes et basses températures, Ogasa [166] confirme les résultats ci-dessus. Il a observé que la limite de concentration des solutions de NaCl permettant la germination est de 200 milliéquivalents/litre pour les températures élevées (30° C), et 300 milliéquivalents/litre pour les températures basses (15° C).

Les études de germination sur le terrain ne peuvent pas conduire à des résultats aussi nets que des expériences de culture en serre faites sur sol et dans l'eau, étant donné que plusieurs facteurs ne sont pas contrôlables. 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 observé 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 où la teneur en sels est très forte, 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 la culture de la betterave à sucre n'est pas rentable en sol salin parce qu'on n'obtient pas une densité suffisante de plantes, et que, même si l'on y parvient, la croissance est ralentie. La salinité de leurs terrains d'expérience allait de 2.000 à 10.000 p.p.m. Sans lessivage, germination et rendements étaient faibles ; mais, si l'on irriguait avant la levée, la densité passait de 20 ou 30 à 70 betteraves par 100 pieds de ligne, et à 80 avec trois irrigations avant la levée.

SPÉCIFICITÉ DE LA TOLÉRANCE AUX SELS

Les bases physiologiques de la tolérance aux sels et l'action de sous-sols salins ou alcalins sur la croissance et la germination ont été examinées dans les sections qui précèdent. Il nous reste à étudier le degré de tolé-

rance aux sels propre aux différentes espèces et variétés végétales. Il existe de nombreux travaux sur ce sujet, mais, dans beaucoup d'entre eux, il n'est pas fait de distinction entre les sols salins et alcalins, et les résul-

tats 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.

De premières recherches ont mis en évidence des différences de tolérance aux sels entre diverses espèces et variétés de plantes cultivées lorsqu'elles étaient examinées dans des conditions de salinité constantes. Buffum [34] a montré 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] a fait sur le terrain des recherches relatives à la tolérance aux sels d'arbres fruitiers, de légumés, de céréales et de plantes fourragères et il a exprimé leur tolérance relative aux sels par la plus forte quantité de sels à laquelle la plante ne réagissait pas. La quantité de sels était exprimée dans chaque cas par le poids total de sels (en livres) par acre et pour une profondeur de 1,20 m. Loughridge a également indiqué les valeurs de tolérance maximum pour chacun des trois sels les plus communs dans les sols de l'ouest des États-Unis : SO_4Na_2 , CO_3Na_2 et $NaCl$. Hilgard [110], en analysant ce travail, remarque que « les chiffres de tolérance

seraient très différents si, au lieu de faire agir chaque sel séparément, on opérât en présence d'autres sels, ou encore si l'on calculait la moyenne — après application de coefficients proportionnels — des résultats obtenus séparément ». Harris [85] a reconnu, lui aussi, qu'il est bien difficile de déterminer la tolérance relative aux sels de telle ou telle plante sur la seule base de la quantité de sels qu'elle a pu supporter, et il a fait observer que « le sol, l'humidité, le climat, ainsi que peut-être d'autres facteurs modifient souvent quelque peu la tolérance relative des différentes plantes, de sorte que de légères différences de tolérance ne sont guère significatives ».

Une des premières tentatives de classification des plantes cultivées d'après leur tolérance au sel a été celle de Kearney et Scofield [122], qui ont publié une étude relative au choix des plantes à cultiver sur les terres salines en se basant sur le pourcentage (en poids) de sels solubles par rapport au poids sec total de la couche de sol atteinte par les racines. Ils ont utilisé 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. Ils ont toutefois

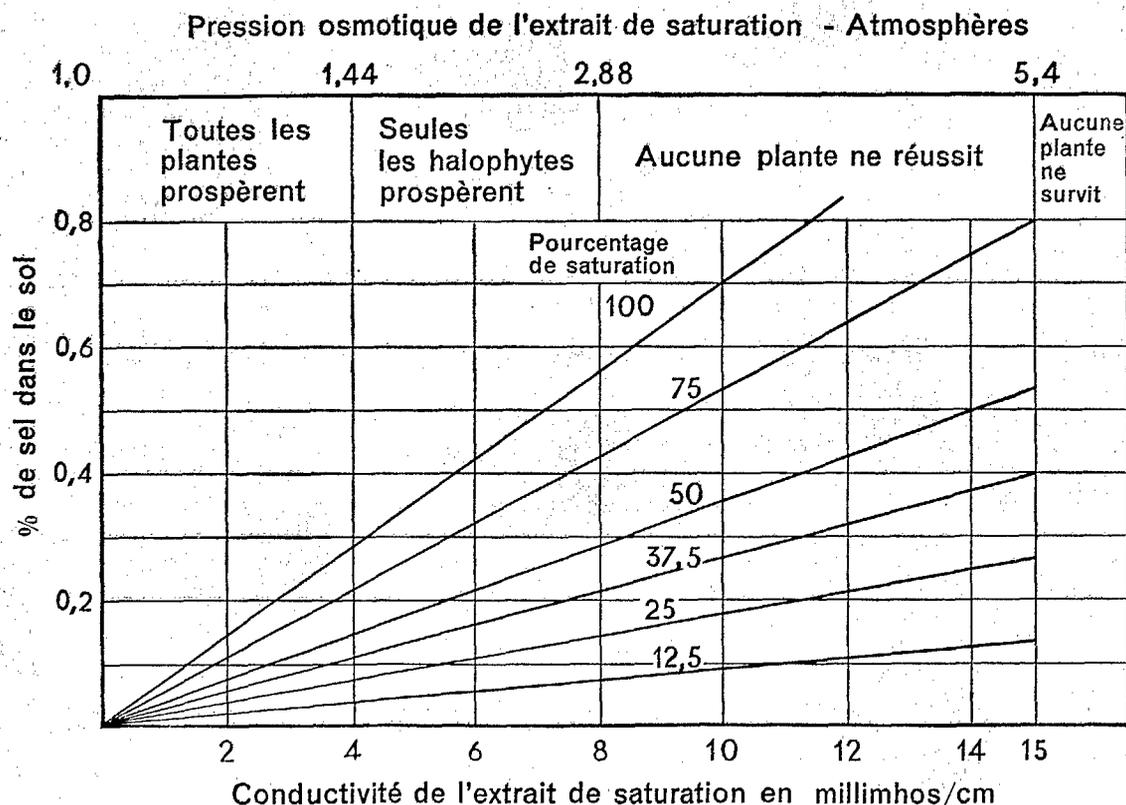


FIGURE 6. Représentation graphique de la croissance des plantes en fonction de la conductivité ou de la pression osmotique de l'extrait de saturation, et du pourcentage de sel dans un sol salin (d'après le U.S. Regional Salinity Laboratory [230]).

reconnu qu'une classification en pourcentages du sol sec ne tient pas compte du facteur humidité du sol et ils ont précisé que « ce qui importe, pour la croissance de la plante, c'est la concentration de la solution du sol et non la quantité totale de sels présents dans le sol ». En conséquence, en établissant les catégories ci-dessus, ils ont pris comme hypothèse que « le sol utilisé a un degré d'humidité 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 jardin et de culture maraîchère, arbres et arbustes y compris les arbres fruitiers, d'ornement et les essences d'ombre. Ils ont noté de fortes variations dans la tolérance aux sels chez les divers membres de ces groupes de plantes.

Le U.S. Salinity Laboratory a inscrit à son programme de recherches des études sur la tolérance aux sels et fait publier des listes indiquant la tolérance aux sels relative d'un certain nombre de plantes cultivées [96, 146, 230]. Dans la publication la plus récente [230], les plantes de culture fruitière, agricole, potagère et fourragère ont été classées selon leur tolérance aux sels (bonne, moyenne ou médiocre) : à cette fin, on a évalué la salinité du sol et sa relation avec la croissance de la plante d'après la conductivité électrique de l'extrait de saturation du sol (EC_e). En utilisant cette mesure, on pouvait escompter qu'un EC_e de 4 millimhos par centimètre (0,1 % de sel dans un sol de contexture moyenne) provoquerait une inhibition nette de la croissance des plantes de tolérance médiocre. Des plantes moyennement tolérantes peuvent croître normalement quand EC_e ne dépasse pas 8 millimhos par centimètre, la croissance est généralement réduite si EC_e est compris entre 8 et 15 millimhos par centimètre, et, à de rares exceptions près, aucune plante sauf des halophytes indigènes ne peut prospérer lorsque EC_e dépasse 15 millimhos (fig. 6).

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 très marquées [75, 85, 122, 146]. Les graminées les plus tolérantes aux sels sur lesquelles des expériences ont été faites aux États-Unis sont : *Sporobolus airoides*, *Distichlis spicata*, *Puccinellia Nuttalliana*, *Cynodon Dactylon*, *Chloris gayana*, *Agropyron Smithii*. Au Canada, McKenzie et Bolton [143] ont essayé un certain nombre de graminées dans des sols lourds et salins ; ils ont découvert que les mieux adaptées au sol et aux conditions climatiques sont *Agropyron trachycaulum*, *Bromus* sp., *Agropyron cristatum*, *Festuca* sp. et *Phalaris arundinacea*. En Australie, Millington et ses collaborateurs [155] ont fait un essai de culture de plantes de pâturage dans des sols salinisés, et ont trouvé que *Pholiurus incurvis*, *Hordeum marinum* et *Lolium rigidum* ont une tolérance aux sels relativement bonne. Ces auteurs notent également que *Cynodon Dactylon* a une tolérance moyenne aux

sels. Burvill [38, 39] indique de son côté que *Pholiurus incurvis* a une bonne tolérance ; et pour les terres salines 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 elle a été étudiée à fond en vue de la détermination de sa tolérance aux sels [1, 50, 55, 71, 85, 122, 143, 145, 155, 161]. On a noté que la luzerne devient, avec l'âge, plus tolérante aux sels, mais qu'il peut être difficile de la faire prospérer, étant donné son inaptitude à germer sur des sous-sols très salins [12, 122, 161]. On a lieu de penser que la tolérance aux sels diffère d'une variété à l'autre, mais on a peu de données sur ce sujet [100].

Ayers [7] a indiqué que le lotier, *Lotus 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 (5.000 et 7.500 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. Kearney et Seofield [122], ainsi qu'Ahi et Powers [1] le considèrent comme remarquable, mais Gauch et Magstad [71] estiment 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 ; ils tendent à faire ressortir que la tolérance aux sels d'une variété donnée peut être modifiée de façon appréciable par d'autres facteurs mésologiques. La possibilité de différences de tolérance au sein d'une même espèce est illustrée par l'étude de cinq lignées de *Trifolium fragiferum* où Gauch et Magstad [71] ont relevé des différences nettes entre des lignées provenant de diverses régions de l'ouest des États-Unis.

On a fait de nombreuses études sur 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 tolérance décroissante : 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 est très tolérante 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 enregistré de bons résultats avec cette variété [155], et Marshall [149] a obtenu, pour l'orge Régal, une bonne densité et une maturation satisfaisante dans un sol contenant une moyenne de 0,89 % de sels (secs à l'air) jusqu'à 25 cm de profondeur. 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 de différences entre les variétés.

On considère que le riz a une tolérance aux sels moyenne, et il est réputé bien pousser en Égypte où la teneur du sol en sels atteint 1 % (surtout NaCl) [122]. Kapp [118] a trouvé, dans l'Arkansas, que 5.700 p.p.m. de NaCl empêchaient la formation du grain, mais ne produisaient qu'une faible diminution de la paille. La germination était réduite par cette concentration. Le maïs, *Zea mays*, est la céréale la plus sensible aux sels et peut ne pas donner une production satisfaisante même sur des sols légèrement salins [85, 122]. Wadleigh et ses collaborateurs [247] ont observé que le maïs Mexican June est moins tolérant que la luzerne et plus que le haricot.

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 plantule¹. Shaw [204] a constaté que certaines betteraves peuvent supporter des concentrations de sels égales à 0,43 % du sol sec à une profondeur de 60 cm, et Kearney et Scofield [122] affirment 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, celle-ci ayant une influence sur la production du sucre. Eaton [55], qui a expérimenté sur les betteraves à sucre U.S. n° 1, indique un haut degré de tolérance au Cl, mais non aux sulfates, 50 milliéquivalents de SO₄ par litre provoquant une plus forte réduction de production que 150 milliéquivalents de Cl par litre 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 certaines cucurbitacées ont montré une tolérance moyenne ou assez bonne. Le haricot et le radis sont très sensibles aux sels. Bernstein et Ayers [22] ont fait des expériences sur six variétés de haricots verts et constaté que, de tous les légumes essayés, ce sont eux qui ont la plus faible tolérance aux sels. Ils ont relevé des différences statistiques nettes dans la production des variétés,

mais ces différences n'étaient pas assez fortes pour présenter une importance pratique. La production moyenne de toutes les variétés cultivées sur des terrains irrigués avec de l'eau contenant 3.000 p.p.m. de sels en mélange n'atteignait que 42 % de celle du témoin, et à 6.000 p.p.m. la production des haricots était réduite à 13 %. Des expériences semblables sur la laitue ont montré qu'elle a une tolérance aux sels moyenne, et on a relevé des différences statistiques nettes entre les tolérances relatives des six variétés étudiées [13]. Quand on irriguait avec de l'eau contenant 3.550 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 9.550 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 CaCl₂ pour des taux allant de 2.000 à 6.000 p.p.m. Ils ont constaté que les pommes de terre ont une tolérance aux sels moyenne, et qu'elles produisent 79, 64 et 42 % de tubercules par rapport au témoin pour les taux de 2.000, 4.000 et 6.000 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 salinité [122]. Les variétés égyptiennes ou à fibres longues sont plus tolérantes que les variétés à fibres courtes. Kearney [119] affirme que le coton supporte sans dommage de 0,4 à 0,6 % de sels et Wadleigh et ses collaborateurs [247] ont trouvé que les racines de cotonnier peuvent 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 signalent 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 ayant de bons rendements relatifs sur des sous-sols salins, ont toujours montré 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 en serre, à des concentrations osmotiques de 1,5 à 4,5 atmosphères, en ajoutant séparément NaCl, CaCl₂, et SO₄Na₂ 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 SO₄Na₂, aucune graine ne mûrissait.

On a peu de renseignements sur les cultures fruitières. Le palmier dattier est, parmi les végétaux cultivés, un des plus tolérants [85]. Magistad et Reitemeir [147] signalent une croissance des dattiers dans la vallée de Coachella en Californie, où la solution du sol, pour une teneur en humidité voisine du pourcentage de

1. Voir p. 54.

flétrissement, contenait 15.000 p.p.m. de sels, soit une concentration osmotique de 7 atmosphères. Le figuier, le grenadier, l'olivier et la vigne sont moyennement tolérants, tandis que les agrumes, les pommes, les poires et les fruits à drupes sont généralement considérés comme ayant une tolérance au sel qui varie entre « assez bonne » et « médiocre » [146, 230]. Loughridge a observé [136] la croissance vigoureuse de variétés de vignes persanes dans des sols ne contenant pas moins de 0,28 % de sels. Ravikovitch et Bidner [184] ont étudié l'effet de la salinité sur le chasselas et le muscat de Hambourg, et 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. Elberta est sensible à une concentration moyenne de sels; ils déclarent qu'on peut s'attendre à ce que les rendements diminuent au bout de quelques années si la pression osmotique du sous-sol dépasse 2 atmosphères. Lilleland et ses collaborateurs [134] ont noté des différences entre variétés dans la toxicité du Na pour l'aman-dier, la variété du Texas étant plus sensible que le Non-pareil et le Nec plus ultra. Wadleigh et ses collaborateurs [248] ont étudié six variétés de fruits à noyau cultivées sur de vastes étendues de sable, en plein air; en prenant comme référence la croissance de la première année, ils ont trouvé qu'un excès de CaCl_2 dans la solution de culture était plus nocive que NaCl, à pression osmotique égale. 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 NaCl. (Kelley et Thomas [126], Loughridge [136]). Les citrons sont les plus sensibles, et les

oranges occupent une position intermédiaire entre les citrons et les pamplemousses. Cooper et Gorton [45] ont étudié la tolérance aux sels de vingt souches différentes du pamplemousse Shary Red et constaté que la mandarine var. Cleopatra est plus tolérante que *Citrus aurantium*, tandis que *Citrus sinensis* var. Florida, l'orange à trois feuilles et le cédrat sont moins tolérants que *Citrus aurantium*. Parmi les autres arbres fruitiers sensibles aux sels il faut citer *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 observé que les conifères sont moins tolérants que les arbres à feuillage caduc. Treize espèces à feuillage caduc furent étudiées, et celles qui montrèrent la plus grande 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, relève que le pacanier, l'orme, et l'hickory sont 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 aux sels. Tout d'abord, il est évident qu'il existe des différences nettes dans la tolérance aux sels relative des divers genres, espèces et variétés des plantes agricoles. En second lieu, pour apprécier correctement la tolérance aux sels, il est nécessaire de prendre en considération d'autres critères tels que l'humidité du sol et le climat. Il est clair également qu'en raison de la spécificité dans la tolérance, il importe de sélectionner de façon appropriée les plantes à cultiver dans les sols marginaux du point de vue de la salinité.

IMPORTANCE DU PROBLÈME DE LA SALINITÉ 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 examiné 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 de la salinité dans les régions géographiques assignées à l'auteur et d'appeler l'attention sur les travaux effectués à ce sujet et qui n'ont pas été publiés.

AUSTRALIE¹

Le problème de la salinité en Australie est limité en gros à la partie sud du pays, Australie-Occidentale, Australie-Méridionale, Victoria, et le district de Riverina

de la Nouvelle-Galles du Sud; mais on trouve aussi des sols salins d'étendue limitée dans d'autres régions, notamment la partie inférieure de la vallée du Burdekin dans le North Queensland. Prescott [177] a distingué dix-huit zones de sols dans sa carte des sols de l'Australie, dont trois sont caractérisées par une certaine salinité.

1. L'auteur tient à exprimer sa reconnaissance aux personnalités suivantes qui l'ont aidé à préparer cette section: J.A. Prescott, directeur du Waite Institute; J. K. Taylor, chef de la Division des sols, et John Hutton, de cette même division, C.S.I.R.O., Adélaïde; G.D. Hubble, Division des sols, Plant and soils Laboratory, Brisbane; G.H. Burvill, inspecteur de la conservation des sols, Perth; E.S. West, directeur de l'Irrigation Research Station, Griffith; L.G. Vallance, sous-directeur du Bureau of Sugar Experiment Stations, Brisbane; S.B. Dickinson, directeur des mines, Adélaïde; R.W. Prunster, directeur du Regional Pastoral Laboratory Deniliquin, N.S.W.; et A.C. Orvedal, de la Division of Soil Survey, U.S. Department of Agriculture.

Les sols du type solonetz, où l'horizon B présente une nette structure prismatique, occupent une faible superficie, environ 50.000 km² sur la carte, soit 0,6 % de la surface totale. On les trouve 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 subcôtières 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 les régions des États 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 maximum 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 km², 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 augmente avec la profondeur dans un sol vierge. NaCl forme une partie à peu près constante des sels, et le gypse est souvent présent [178, 224]. Teakle [222] a publié des travaux sur les sols solonisés ou alcalins de l'Australie-Occidentale; il note qu'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 elle dépasse souvent 0,25 % en dessous de 60 cm.

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 partant du Wimmera dans l'État de Victoria, et formant la masse des sols de plaine de la Riverina, des Western Darling Downs, des Downs ondulées du Queensland du nord-ouest, du Barkly Tableland et des Victoria River Downs dans le Territoire du Nord, et les sols alluviaux plus lourds des fleuves Ord et Fitzroy dans les Kimberleys (Australie-Occidentale). Ces sols couvrent 700.000 km², soit 9,1 % de la superficie totale. Ce sont uniformément des argiles lourdes, grises ou brunes, le profil est faiblement alcalin en surface, et moyennement ou fortement en profondeur. Suivant Taylor [6], il existe des preuves d'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 de gypse est caractéristique de certaines régions du Queensland. Ces sols comprennent quelques-uns des meilleurs pâturages d'Australie.

Barley¹, du Regional Pastoral Laboratory, Deniliquin, N.S.W., a rendu compte de la structure des sols halomorphiques de la plaine de Riverina. L'analyse de trois types de sol 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 la 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 micro-organismes ont une influence visible sur la structure du sol ».

Burvell [37, 38] a étudié le problème des sels en Australie-Occidentale et attribué la salinité du sol à la production de sels solubles dans l'eau par la décomposition des minéraux et le dépôt cyclique de sels apportés par les pluies. Teakle [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 salins d'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 des États de la Nouvelle-Galles du Sud, de l'État 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'on peut espérer lutter avec succès contre la salinité du sol par un drainage approprié. Lyon² a fait une étude sur l'eau du fleuve Murray; il note que sa qualité est bonne depuis que le débit a été régularisé par des barrages et des lacs de retenue 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 oscillé entre 30 et 200 p.p.m., avec une moyenne de 99 p.p.m. À 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

1. K.P. BARLEY, *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 Organization, 1951. Multigraphié.
2. A.V. LYON, *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, 1950. Multigraphié.

des caractéristiques fixes. Il y a relativement beaucoup de sulfates et de bicarbonates, et Cl n'est pas l'anion dominant. Le chiffre de NaCl calculé d'après la concentration en ions Cl est habituellement compris entre la moitié et le sixième du total des sels solubles.

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 qu'il s'agisse de sols perméables et bien drainés ; il a en outre établi la liste de la tolérance relative d'un certain nombre de plantes cultivées sous irrigation. Il signale que le haricot, la laitue, le concombre, la tomate et les agrumes ont une tolérance faible, et la luzerne une tolérance forte. Barnes [17], qui a effectué une étude semblable sur les eaux souterraines du bassin du Murray, signale qu'une majorité de plantes agricoles, à l'exception des haricots, des agrumes et des fruits à noyau, poussent de façon satisfaisante avec de l'eau d'irrigation contenant au total 2.150 p.p.m. de sels si le sol est perméable et a un bon drainage en profondeur. Comme Ward, il tient pour douteuse l'eau à plus de 3.000 p.p.m., mais il note un cas où l'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 de la région d'Adelaide (Australie-Méridionale) en ce qui concerne l'irrigation.

Outre les études de Millington et ses collaborateurs [155], de Burvill [38], ainsi que de Burvill et Marshall [39], qui sont analysées ailleurs¹, 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 dressé une liste indiquant la tolérance aux sels de 28 plantes cultivées et indigènes, en pourcentage de NaCl, dans les 15 premiers centimètres 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 *C. truncata* (0,6 %), *Festuca myuros* (0,6 %), *Cynodon Dactylon* (0,6 %) et *Trifolium tomentosum* (0,6 %). Penman et Provan [171], qui ont étudié la tolérance aux sels des espèces du genre citrus, notent que des dégâts et un retard ont lieu dans la croissance quand la concentration de NaCl dans les 90 premiers centimètres du sol atteint 0,05-0,06 %, et que la mort survient 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 signale de graves dommages lorsqu'il y a plus de 1 % de Cl dans la feuille.

INDE ET PAKISTAN

En Inde et au Pakistan on rencontre des sols salins et alcalins surtout dans les régions suivantes : a) toute la vallée de l'Indus ; b) les vallées et bassins fluviaux de l'Inde occidentale et du Pakistan ; c) la vallée du Gange approximativement à l'ouest du 80° degré de longitude E. ; d) les hautes terres du plateau du Dekkan, en particulier entre les fleuves Tapti, Godavari et Bhima ; e) les marais salants de la côte et des deltas du Gange, de l'Indus, du Cauvery et du Mahanadi ; f) les plaines côtières salées le long du Rann de Cutch.

On a pris conscience du problème du sel en Inde dès 1876, quand fut établie la Commission du « reh »², 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 cette commission, où sont examinées les conditions dans lesquelles le reh se constitue dans les provinces, et qui contient des recommandations sur la manière d'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 proche de la surface, et la commission a vu dans la création de canaux d'irrigation la principale cause de l'extension du reh. Elle a recommandé 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 en profondeur pour évacuer l'eau en excès dans le sous-sol et les sels du reh.

Gangulee [67] a exposé les problèmes du sol alcalin ou « usar » dans les régions arides ou semi-arides. Il cite Voelcker qui évalue à 10.500 ou 13.000 km² la superficie de l'usar dans les seules provinces du nord-ouest, et Hill, selon lequel il y en avait plus de 800.000 hectares dans toute l'Inde, en 1903. Il déclare ensuite : « On peut raisonnablement penser qu'une très grande partie de la vaste région définie 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 CO₃Ca produisent ce qu'on appelle les sols d'alcali noir de la plaine indo-gangétique, et l'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.

Du point de vue de la tolérance aux sels, Gangulee énumère un certain nombre de graminées qu'on trouve dans les régions à alcalis : usar, *Tetrapogon tetrastachys* ; kar usara, *Sporobolus pallidus*, *Saccharum spontaneum*,

1. Voir : « Spécificité de la tolérance aux sels », p. 55.

2. Le terme « reh » est utilisé pour désigner des « sels alcalins », ou un sel très soluble commun à de nombreux sols de l'Inde.

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*; sorji, *Melilotus indica*; wal, *Dolichos lablad*; 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 [131] a étudié l'usar (terres alcalines) des Provinces Unies, et n'est pas complètement d'accord avec la Commission du reh. Il affirme que l'alcali est un produit du sol lui-même et n'est pas déposé par l'eau des canaux; il n'a relevé aucune différence appréciable 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_3Na_2 , CO_3HNa , mais pas d'autres sels alcalins. Une régénération est possible 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 (Provinces Unies) ont révélé une très forte teneur en sels solubles, surtout dans les 45 premiers centimètres, 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 Na échangeable était voisin de 100 à la plupart des profondeurs¹.

Auden et ses collaborateurs [5] ont publié une étude sur les sels de Na dans les sols reh des Provinces Unies. Ils considèrent que les termes « reh », « kalar » et « thur » sont synonymes et définissent le reh comme une croûte salée que l'on trouve sur les alluvions où CO_3Na_2 est généralement en excédent par rapport à SO_4Na_2 . Les principaux facteurs de la formation des sels du reh sont : a) l'alternance de saisons sèches et humides, b) des pentes faibles de l'ordre de 1/1.000, c) une nappe phréatique voisine de la surface, d) des roches riches en sels de soude, e) une certaine qualité de l'eau souterraine et de l'eau d'irrigation, f) des réactions d'échanges de base. Ils ne peuvent se prononcer sur l'origine du NaCl qu'on trouve dans ces sols.

Basu et ses associés [19, 20, 21] ont souligné la complexité du problème des sols salins dans l'État 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-Dekkan sont : a) l'aridité du climat combinée à la grande profondeur du sol, b) 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, c) la proximité d'eau salée dans le sous-sol, d) l'imperméabilité du sous-sol, f) la présence de couches salifères dans le sous-sol.

De nombreux sols du Dekkan 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 consi-

dérés 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 Tagarc [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 jachère aidaient à réduire le Na colloïdal et à augmenter la proportion de Ca colloïdal. Quand 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 1,25 tonne et 5 tonnes respectivement par hectare. Les molasses (25 tonnes/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 conclu que la formation d'un sol salé était liée à l'existence du canal, ainsi qu'à l'élévation du niveau de l'eau par irrigation sans drainage adéquat. Le lavage au moyen de petits drains coupant les canaux de drainage naturels suffit habituellement à remettre en état, en une 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 avoir enlevé une partie du sel. Les plantes les plus tolérantes aux sels sont : le wal, *Dolichos lablad*; le chowli, *Vigna catiang*; et l'ambadi, *Hibiscus cannabinus*.

Le problème des sels au Pakistan sortirait du cadre du présent rapport, mais les conditions de salinité et d'alcalinité sont si semblables à celles de l'Inde que nous ferons une brève mention 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 aussi une quantité appréciable de SO_4Na_2 . Le CO_3Na_2 qui constitue le kalar noir n'est pas commun dans les sols du Sind. Tamhane 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 de la salinité. Mehta [153] a étudié la formation et la remise en état des « thur » (sols salins) et il propose une classification des sols en cinq types d'après le taux de sels solubles et le pH. Les thur peuvent être remis en état par une ou deux récoltes de riz, et l'on peut obtenir ensuite d'excellentes récoltes de coton, de blé et de canne à sucre — et cela même

1. Analyses effectuées par le U.S. Salinity Laboratory à la demande du Dr C. Maya-Das, anciennement Director of Agriculture, Lucknow, Provinces Unies.

pendant huit 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; ils concluent que les mesures physico-chimiques 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 : a) la totalité des matières en suspension dans l'eau, b) le rapport Na/Ca dans la solution, c) 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 observé que la quantité de Na échangeable est le facteur qui limite la production du blé; Mehta [152], de son côté, 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 dont le pH est fort et la teneur en sels relativement élevée paraît donner une meilleure 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. Hoon 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 de bons indicateurs des propriétés du sol, y compris l'alcalinité et la teneur en sels solubles.

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 formule la conclusion suivante : bien qu'on ait accordé l'attention qu'il mérite au problème de la salinité, étroitement lié à d'autres problèmes des zones arides, aucune solution n'est encore en vue. Il semble que, plutôt qu'une tentative de dessalage à vaste échelle, ce soit l'adaptation des façons culturales actuelles à la qualité de l'eau de ces zones qui ait le plus de chances de donner des résultats dans un délai raisonnable.

AMÉRIQUE DU SUD ET AMÉRIQUE CENTRALE ¹

On a peu d'informations intéressant particulièrement le problème de la salinité 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 alcalins en vue de les aménager et d'agrandir la superficie cultivable par l'irrigation, le lessivage et d'autres méthodes de régénération.

ARGENTINE ET CHILI

Vessel [236] a établi une carte générale des associations des sols en Argentine et au 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 de type solonetz et solontchak dans les parties nord et centre-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 rouge dans la partie occidentale de la Pampa; dans la région chaude semi-aride, et ils sont parfois interrompus par des dépressions peu profondes de solontchaks et de marais salants. Les solonetz s'étendent largement dans les parties est et nord-est de la région. On rencontre les sols brun rouge dans le bassin des pré-Andes et l'ouest du Chaco; on trouve de larges plaines salées dans la partie nord de cette région. Il existe des sols alluviaux salins le long du rio Bermejo, et des solontchaks et des solonetz leur sont normalement associés. Les solontchaks dominent à Mar Chiquita, marais salant 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 du 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 côtière. Les dunes de sable sont très étendues et il existe des sols salins ou solontchaks dans les dépressions. Dans l'Atacama, il y a cinq zones distinctes entre Pisagua et Taltal, où se trouvent de riches gisements de nitrate de Na dans des couches de caliche qui peuvent varier en épaisseur de quelques centimètres à 1 ou 2 mètres. Ils contiennent aussi NaCl et quelques iodures [116].

Storie et Mathews [216] ont signalé des sols salins dans les environs d'Iquique. Ces sols sont brun gris, riches en chaux, et ont une teneur faible ou moyenne 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 l'on y a commencé quelques études sur la remise en valeur des sols salins alcalins par lessivage et irrigation. Le directeur, Enrique Froehlich ² fait savoir que le reboisement avec un arbre très résistant au sel, le tamarugo, est en cours; des expériences ont

1. L'auteur tient à exprimer ses remerciements aux personnes suivantes qui l'ont aidé à préparer cette section de son étude : A.A. Bitancourt, directeur de l'Institut biologique de São Paulo (Brésil); Jose Guimeraes Duque, directeur du Service agricole et industriel de Fortaleza-Ceara, Brésil; et Jose Vivas, du Ministère du développement, Lima (Pérou).

2. Communication personnelle de Enrique Froehlich L., Iquique (Chili).

Utilisation des eaux salines

été entreprises sur 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). Les sols du centre-nord du Chili reposent, semble-t-il, 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.

PÉROU ET ÉQUATEUR

Le problème de la salinité se pose à peu près de la même façon au Pérou et dans l'Équateur que dans le nord du Chili, et il est essentiellement limité aux régions côtières semi-arides où la pluviosité est inférieure à 25 cm. 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 quelque quarante 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 volume suffisant pour traverser le désert, et atteindre 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 que la possibilité d'une agriculture rentable a été sérieusement réduite par la salinité et l'alcalinité dans les parties basses de la plupart des vallées. Il signale des sols salins, salins alcalins, et alcalins non salins, et voit dans l'irrigation, le lessivage et le drainage les moyens de résoudre ce problème complexe. Dans certains cas, la mise en valeur peut nécessiter le recours à l'amendement chimique.

En Équateur, comme au Pérou, on trouve surtout des sols salins et alcalins dans les plaines côtières qui s'étendent entre le fleuve Esmeraldas au nord jusqu'à Machala au sud; 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 Pena¹ 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 l'on trouve des schistes jaunes.

BRÉSIL

Bien que les États-Unis du Brésil occupent presque la moitié du continent sud-américain, le problème de la salinité n'y est pas grave. La pluie suffit généralement au lessivage du sol, et à la seule exception d'une

petite partie de la région nommée Sertao [116], qui 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 la nécessité de l'irrigation. Le Service agricole et industriel de Fortaleza-Ceara a entrepris l'étude des sols que l'on rencontre dans les régions semi-arides du nord-est du Brésil². Les recherches ont été limitées aux bassins d'irrigation où le gouvernement fédéral a construit des réservoirs pour fournir l'eau d'irrigation. On rencontre un peu partout des sols salins et alcalins, le sel le plus répandu étant NaCl. Sur les quelque 125.000 hectares étudiés, 25 à 30 % des sols sont salins ou alcalins. On a noté trois étapes dans le processus de salinisation et d'alcalinisation des sols; elles correspondent aux sols salins, salins alcalins, et légèrement salins alcalins décrits par de Sigmond [206]. Le service s'est aussi penché sur le problème de la qualité de l'eau d'irrigation, et il signale que quelques-uns des réservoirs contiennent de l'eau saumâtre qui doit être utilisée avec précaution. En ce qui concerne la tolérance aux sels, un palmier, *Copernicia cerifera*, qui produit de la cire, et le cotonnier sont, parmi les végétaux cultivés, ceux qui semblent les plus prometteurs.

MEXIQUE

On trouve des sols salins dans toutes les régions agricoles du nord du Mexique, dans les États de Sonora et Sinaloa le long de la côte ouest, dans l'État 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, a provoqué la mise à découvert, dans le fond du lac, d'un sol si riche en sels que toute végétation est impossible sans une mise en valeur onéreuse comportant un traitement chimique [116]. Ce sol est salin alcalin, riche en sels (3 % ou plus dans certains cas), avec un pH élevé. Une analyse 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 SO_4Na_2 , et il y avait un peu de CO_3Na_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'État de Chihuahua, le long du 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'État de Tamaulipas. La salinité, l'alcalinité et la faible quantité d'eau disponible pour l'irrigation et le lessivage font que le problème du sel se pose avec acuité dans ces régions. On a peu de renseignements précis sur les caractéristiques chimiques des sols de cette région.

1. Communication personnelle de Julio Pena, H., Quito (Équateur).
2. Communication personnelle de J.G. Duque, chef du Service agricole et industriel de Fortaleza-Ceara (Brésil).

L'analyse¹ de deux sols de la région de Rio Casa Grandes (État 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 inondable avec de nombreuses parties dénudées, et où l'essentiel de la végétation est constitué par une savane à *Sporobolus* et *Hilaria*, mélangés parfois de « mesquite », *Prosopis*. Puertas Fabila [179] a signalé des sols alcalins dans les États de Nuevo León 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 Torreón (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 Torreón.

Sur la côte ouest, les bonnes terres sont si bon marché et si abondantes en raison de l'eau disponible pour l'irrigation que les sels ne constituent pas un problème grave. Mais dans les régions de Ciudad Obregón (Sonora) et Culiacan (Sinaloa), de nombreux sols sont de texture fine, avec une faible perméabilité, et, à la suite d'une utilisation excessive de l'eau et d'un drainage insuffisant, beaucoup d'entre eux ont perdu leurs sels minéraux par lessivage. 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 situé près de Caborca (Sonora), 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 5.000 p.p.m. de sels totaux, Na constituant 55 % des cations². On étudie la qualité de l'eau d'irrigation à l'Institut de technologie de Monterrey, 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 à forte salinité. 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 l'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. Puertos Fabila [179] recommande aussi la betterave à sucre, le sorgho et l'orge. Robles Gutierrez [191] déclare que le sorgho, *Sorghum vulgare*, est bien adapté à la salinité dans les régions semi-désertiques du Mexique.

AMÉRIQUE DU NORD

CANADA³

Au Canada, le problème du sel se pose surtout dans la région des grandes plaines et dans les provinces de l'Alberta et du Saskatchewan. Selon Wilcox [252],

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 Canada, et ils considèrent les sols bruns, brun foncé (ou châtain) 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 solontchaks. Des surfaces importantes de sols de type solodi-solonetz et solod, accompagnées de parties « glacées » en surface sont associées à des formations de schistes marins ou de dépôts côtiers saumâtres qui sont l'origine des sels solubles trouvés dans l'horizon A ou dans les horizons B inférieurs. Bowser et Moss [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 ceux qui ont été utilisés 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'il 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 SO_4Ca) dans les 65 premiers centimètres, 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 qu'on trouve très 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 CO_3Na_2 se rencontre peu fréquemment. On a cartographié environ 360.000 hectares comme zones à sols alcalins, la plus grande partie de cette surface se trouvant dans les zones plus arides à sols bruns et brun noir de la partie sud-ouest de la province. Dans la partie est, la principale zone de sols salins se trouve dans la région plus humide des sols noirs.

Il existe plusieurs publications importantes sur la tolérance aux sels relative des plantes cultivées sous irrigation au Saskatchewan. McKenzie 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 sont les mieux adaptées aux sols salins lourds. Marshall [149], et Doughty et Stalwick [50] ont étudié la tolérance aux sels des céréales et de la luzerne. L'orge est très indiquée pour les sols salins

1. Par le U.S. Salinity Laboratory.

2. Communication personnelle de E.M. Long, Hermosillo (Sonora, Mexique).

3. Des remerciements sont dus à MM. J.D. Newton, de l'Université d'Alberta, Edmonton, J.L. Doughty, Swift Current Exp. Sta., Sask.; A. Leahy, Central Exp. Farm, Ottawa, pour l'aide qu'ils ont apportée à la préparation de cette section.

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 inférieures à 0,4 % n'ont provoqué qu'une légère réduction dans la production de cinq 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.), dans lesquels figurent 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, 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 sol.

Les sols salins et alcalins de l'Alberta ont été étudiés par Wyatt et ses collaborateurs [256], MacGregor et Wyatt [141], et Odynsky [165]. Selon Odynsky, les solonetz sont fréquents, et les zones dans lesquelles 20 % au moins des sols sont des solonetz représentent au total environ 2.800.000 hectares dans la partie de l'Alberta qui se trouve au sud et à l'est d'Edmonton, et à l'est du 5^e méridien. Ils prennent le maximum d'extension dans les zones où la couche géologique est constituée de schistes marins saumâtres et de grès. Cet auteur considère que les sols du type 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 vingt ans d'irrigation sur la nature et la situation des sels solubles dans les sols de l'Alberta. Les données recueillies de 1917 à 1937 montrent que la plus forte concentration de sels se produit au-dessous d'une profondeur de 65 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 fût lente durant cette période, la situation était favorable en ce qui concerne la nature des sels, car Ca restait le cation prédominant.

MacGregor et Wyatt [141] ont étudié les propriétés des sols solonisés des zones de sols 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, mais sont tout de même alcalinisés, bien qu'à un moindre degré ». Le Ca est l'ion dominant dans le complexe d'échange, Mg est nettement moins abondant, et la quantité de Na est inférieure à celle de Ca ou 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 ont conclu que la proportion de CO_3Na_2 par rapport aux autres sels solubles présents est, plutôt que la quantité même de CO_3Na_2 , le facteur important à considérer pour déterminer la valeur du pH du sol.

Palmer [169] 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 est : *Lolium* sp., *Bromus* sp., *Poa pratensis*, *Festuca* sp. et *Trifolium* sp. L'orge est un peu plus tolérante que le blé après germination, et le lin est très sensible aux alcalis. CO_3Na_2 et NaCl sont plus toxiques que SO_4Na_2 ou SO_4Mg , et SO_4Ca n'est pas toxique, même aux concentrations maximums.

D'après Newton² les eaux utilisées pour l'irrigation sont généralement bonnes. Il cite les analyses de quatre eaux d'irrigation typiques, provenant de grandes rivières de l'Alberta, qui contenaient environ 200 p.p.m. de sels totaux.

ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE

Les problèmes concernant les sols salins et alcalins sont de première importance dans l'ouest des États-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 de la salinité. Au cours des soixante dernières années, il est paru de nombreuses publications sur 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 dix-sept États de l'ouest, et en outre 12 millions d'hectares de terres sont classés comme irrigables.

1. Communication personnelle de J.L. Doughty, Swift Current Exp. Station, Sask.

2. Communication personnelle de J.D. Newton, Université d'Alberta, Edmonton (Canada).

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 de dégâts causés par les sels, l'accumulation de sels constitue 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 se pose avec acuité dans les vallées intérieures de Californie (San Joaquin, Sacramento, Coachella, Imperial); le Great Basin, qui comprend une grande partie de l'Utah et du Nevada; le bassin hydrographique du Colorado, qui comprend des parties du Wyoming, de l'Utah, du Colorado, de l'Arizona et de la Californie; le bassin hydrographique du rio Grande, qui comprend les parties du Nouveau-Mexique et du Texas; certaines parties du bassin de la Columbia River dans les États de Washington et de l'Idaho; enfin, 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 indiquant les caractéristiques des sols salins et alcalins que l'on rencontre dans ces régions; beaucoup de ces sols sont décrits dans les publications énumérées au paragraphe précédent et dans les bulletins de la Division of Soil Survey, dont la liste figure dans les manuels précités [210, 230].

Les travaux effectués aux États-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 il faut mentionner les études relatives à l'amélioration et à la mise en valeur de ces sols.

Reeve et ses collaborateurs [186] ont fait des recherches sur le lessivage dans les sols salins alcalins de la région du Delta (Utah) qui ne contiennent 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 30, 60 et 120 cm 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 3,8, 7,15 et 8,3 boisseaux¹ par 1.000 m³ d'eau appliquée pour les trois degrés de lessivage. Ces sols contenaient du gypse en quantités variant de 1,6 à 18,7 tonnes par 1.000 m³, 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 est passée de 25 à 80 betteraves par 30 m de rangée avec trois irrigations avant la levée des semis, et à cet accroissement de densité a correspondu un accroissement de production allant de 1,6 à 8,1 tonnes par hectare. Le lessivage d'hiver effectué en inondant avec 30 à 60 centimètres d'eau a fait monter la production

de 1,6 à 10 et 12,8 tonnes par hectare respectivement. Larson [130] a rendu compte d'aussi bons résultats obtenus avec des irrigations abondantes (1,20 m à 2 m d'eau) dans les terres salées de la Yakima Valley, Washington, avec un rendement moyen de 9,8 tonnes de betteraves à sucre par hectare.

La mise en valeur de sols alcalins par des amendements a fait l'objet de publications de Bower et ses collaborateurs [25], McGeorge [140], Powers [175], Snyder et ses collaborateurs [209], entre autres. Bower et ses collaborateurs ont résumé comme suit les principes de l'amélioration des sols alcalins : a) création d'un système de drainage si l'on a une nappe phréatique voisine du sol, b) remplacement de Na absorbé par Ca dans le complexe d'échange du sol, c) évacuation des sels en excès par lessivage, d) regroupement et agglomération des particules du sol pour améliorer la 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 maximum de Na échangeable se produisit dans les sols traités au soufre, au fumier additionné de soufre, au gypse, et au fumier additionné de gypse. La teneur en sels minéraux de toutes les parcelles de terrain a diminué avec la chaux, ce qui indique un certain degré de lessivage. Les parcelles furentensemencées avec un mélange de graminées et de légumineuses, et irriguées par aspersion. On a obtenu 0,4 tonne de plus par hectare et par an avec le traitement au fumier, et au fumier additionné de chaux, et 0,2 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.

McGeorge [140] a étudié le soufre comme correctif et reconstituant du sol; il en recommande l'utilisation pour les sols alcalino-calcaires. Il l'a trouvé très efficace pour corriger et mettre en valeur des sols alcalins dans l'Arizona; et il recommande des applications de 125 à 2.500 kg par hectare selon la teneur en 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 1.800 kg par hectare) et il a noté qu'il faut moins de soufre quand on l'associe à du fumier de ferme. Snyder et ses collaborateurs [209] ont fait des recherches, pendant une période de sept ans, sur la mise en valeur des sols alcalins dans l'Idaho en utilisant le lessivage et divers traitements chimiques. Ils ont observé que la submersion fréquente par ruissellement superficiel est surtout indiquée pour les types médiocres de sols

1. Aux États-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 (N.D.T.).

alcalins, mais ils ont insisté sur le fait que le drainage du sol est le facteur limitatif d'une mise en valeur rentable. Les traitements chimiques au gypse, au soufre, et à l'acide sulfurique produisent des améliorations notables du sol; mais, en général, le prix de revient est excessif, sauf lorsque la surface à traiter est petite.

Enfin, il convient de mentionner le concept de bilan des sels dans une zone irriguée, dû à Scofield [199]. Ce dernier a étudié deux régions irriguées par le rio Grande et une par le Colorado près de Yuma (Arizona). Il entend par bilan des sels d'une zone irriguée la relation entre la quantité de sels dissous fournis à cette zone dans l'eau d'irrigation et la quantité de sels retirés par les eaux de drainage. Le bilan des sels est favorable quand les sorties de sels égalent ou dépassent les rentrées, mais il est défavorable quand les rentrées dépassent les sorties. Il a donné des méthodes pour

déterminer et calculer les quantités de sels qui entrent dans la zone irriguée ou qui en sortent, et l'évolution du bilan des zones étudiées pendant un certain nombre d'années. Il a réalisé des expériences de laboratoire avec de l'eau d'irrigation ayant une concentration donnée de sels dissous afin de déterminer : a) quelle proportion de l'apport d'eau doit être consacrée au lessivage de la zone des racines pour éviter l'accumulation de sels solubles dans cette partie du sol, et b) quelle proportion des sels dissous dans l'eau d'irrigation est prise à la solution par la plante cultivée ou par le sol. Scofield déclare que « les résultats, soit d'observations sur le terrain, soit d'expériences contrôlées, peuvent permettre de mieux comprendre les facteurs et les relations de cause à effet qui interviennent dans une zone irriguée, en ce qui concerne les sels dissous ou solubles ainsi que le problème d'un drainage satisfaisant ».

BIBLIOGRAPHIE ¹

1. AHI, S. M., et POWERS, W. L., « Salt tolerance of plants at various temperatures », *Plant Physiol.*, vol. 13, 1938, p. 767-789.
 2. ANDERSON, E., *El problema de los suelos salinos y de alcali en la costa del Peru*, Lima, S.C.I.P.A., 1950. (*Series Informaciones Técnicas*, 50).
 3. ASGHAR, A. G., PURI, A. N., et TAYLOR, E. M., « Soil deterioration in the canal-irrigated areas of the Punjab. Part II : Relation between alkalization and dispersion coefficient in deteriorated soils », *Punjab Irrig. Res. Inst. Pub.* 4, n° 8, 1935.
 4. ATKINSON, H. J., BISHOP, R. F., et LEAHEY, A., « Studies on strongly alkaline soils of the salt river plains in northwestern Canada », *Sci. Agr.*, vol. 30, 1950, p. 30-37.
 5. AUDEN, J. A., GUPTA, B. C., ROY, P. C., et HUSSAIN, Mehdi, *Report on sodium salts in reh soils in the United Provinces, with notes on occurrences in other parts of India*, 1942. (*Records of the Geol. Survey* 77, paper n° 1.)
 6. AUSTRALIAN ENVIRONMENT (THE). *Handbook for the British Commonwealth specialist agricultural conference on plant and animal nutrition in relation to soil and climatic factors, held in Australia, August, 1949*, 2^e éd., Melbourne, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1950, 183 pages, ill.
 7. AYERS, A. D. « Salt tolerance of birdsfoot trefoil », *Jour. Amer. Soc. Agron.*, vol. 40, 1948, p. 331-334.
 8. — « Salt tolerance of avocado trees grown in sulfur solutions », *California Avocado Society Yearbook*, 1950, p. 138-148.
 9. — « Seed germination as affected by soil moisture and salinity », *Agron. Jour.*, vol. 44, 1952, p. 82-84.
 10. AYERS, A. D., ALDRICH, D. G., et COONY, J. J., « Sodium and chloride injury on avocado leaves », *Calif. Agr.*, vol. 5, 1951, p. 7.
 11. AYERS, A. D., BROWN, J. W., et WADLEIGH, C. H., « Salt tolerance of barley and wheat in soil plots receiving several salinization regimes », *Agron. Jour.*, 1952.
 12. AYERS, A. D., et HAYWARD, H. E., « A method for measuring the effects of soil salinity on seed germination with observations on several crop plants », *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, vol. 13, 1948, p. 224-226.
 13. AYERS, A. D., WADLEIGH, C. H., et BERNSTEIN, L., « Salt tolerance of six varieties of lettuce », *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, vol. 57, 1951, p. 237-242.
 14. AYERS, A. D., WADLEIGH, C. H., et MAGISTAD, O. C., « The interrelationships of salt concentration and soil moisture content with the growth of beans », *Jour. Amer. Soc. Agron.*, vol. 35, 1943, p. 796-810.
 15. AYERS, H. D., « Soil permeability as a factor in the translocation of salts on irrigated land », *Sci. Agr.*, vol. 31, 1951, p. 383-395.
 16. BALDWIN, J. G., BURVILL, G. H., et FREEDMAN, J. R., « A soil survey of part of the Kerang irrigation district, Victoria », *Counc. Sci. Ind. Res. Austr. Bul.*, n° 125, 1939.
 17. BARNES, T. A., « Underground water survey of portion of Murray basin », *Geol. Survey of South Australia, Bul.*, n° 25, 1951.
 18. BASLAVSKAYA, S. S., « Influence of the chloride ion on the content of carbohydrates in potato leaves », *Plant Physiol.*, vol. 11, 1936, p. 863-872.
 19. BASU, J. K., « Problems of saline soils in the Bombay state, India », *Trans. Intern. Cong. Soil Sci.*, vol. 3, Amsterdam, 1950, p. 169-172.
 20. BASU, J. K., et SIRUR, S. S., « Soils of the Deccan canals. I : Genetic soil survey and soil classification : Nira right bank and Pravara canals », *Ind. Jour. Agr. Sci.*, vol. 8, 1938, p. 637-697.
 21. BASU, J. K., et TAGARE, V. D., « Soils of the Deccan canals. IV : The alkali soils, their nature and management », *Ind. Jour. Agr. Sci.*, vol. 13, 1943, p. 157-181.
1. Voir en fin de bibliographie la liste des abréviations et celle des périodiques.

22. BERNSTEIN, L., et AYERS, A. D., « Salt tolerance of six varieties of green beans », *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, vol. 57, 1951, p. 243-248.
23. BERNSTEIN, L., AYERS, A. D., et WADLEIGH, C. H., « The salt tolerance of White Rose potatoes », *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, vol. 57, 1951, p. 231-236.
24. BERTRAND, G., « Recherches sur la présence générale et sur le rôle probable du sodium dans les plantes », *Ann. Agron. Ser. A.*, vol. 4, 1951, p. 410-413.
25. BOWER, C.A., SWARNER, J.R., MARSH, A.W., et TILSTON, F.M., *The improvement of an alkali soil by treatment with manure and chemical amendments*, 1951. (*Oregon Agr. Expt. Sta. Tech. Bul.*, n° 22.)
26. BOWER, C. A., et TURK, L. M., « Calcium and magnesium deficiencies in alkali soils », *Jour. Amer. Soc. Agron.*, vol. 38, 1946, p. 723-727.
27. BOWER, C. A., et WADLEIGH, C. H., « Growth and cationic accumulation by four species of plants as influenced by various levels of exchangeable sodium », *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, vol. 13, 1948, p. 218-223.
28. BOWSER, W. E., et MOSS, H. C., « A soil rating and classification for irrigation lands in western Canada », *Sci. Agr.*, vol. 30, 1950, p. 165-171.
29. BOYCE, S. G., « Salt hypertrophy in succulent dune plants », *Science*, vol. 114, 1951, p. 544-545.
30. BOYNTON, D., et BURRELL, A. B., « Potassium-induced magnesium deficiency in the McIntosh apple tree », *Soil Sci.*, vol. 58, 1944, p. 441-454.
31. BREAZEALE, J. F., *Alkali tolerance of plants considered as a phenomenon of adaptation*, 1926. (*Arizona Agr. Expt. Sta. Tech. Bul.*, n° 11.)
32. — *A study of the toxicity of salines that occur in black alkali soil*, 1927. (*University of Arizona Tech. Bul.*, n° 14.)
33. BREAZEALE, J. F., et McGEORGE, W. T., *Nutritional disorders in alkaline soils caused by deficiency of carbon dioxide*, 1932. (*Arizona Agr. Expt. Sta. Tech. Bul.*, n° 41.)
34. BUFFUM, B. C., *Alkali : some observations and experiments*, 1896. (*Wyoming Agr. Expt. Sta. Bul.*, n° 29.)
35. — « Alkali studies. III : Germinating experiments with alkali salts », *Wyoming Agr. Expt. Sta., 9th annual rpt.*, 1899, p. 1-40.
36. BURGESS, P. S., *Alkali soil studies and methods of reclamation*, 1928. (*Arizona Agr. Expt. Sta. Tech. Bul.*, n° 123.)
37. BURVILL, G. H., « Soil salinity in the agricultural area of Western Australia », *Jour. Australian Inst. Agr. Sci.*, vol. 13, 1947, p. 9-19.
38. — « The salt problem in the wheat belt », *Jour. Dept. Agr. West. Austr.*, vol. 27, 1950, p. 174-180.
39. BURVILL, G. H., et MARSHALL, A. J. T., *Paspalum vaginatum or seashore paspalum, a summer-growing grass for wet salt affected areas*, Australie, 1951. (Dept. Agr. West. Austr., leaflet, n° 1054.)
40. CASSIDY, N. G., *Irrigation waters of the Burdekin delta*, Dept. Agr., Brisbane, Queensland (Australie), 1937. (*Bur. Sugar Expt. Sta. Tech. Commun.*, n° 1.)
41. CHAPMAN, H. D., et LIEBIG, G. F., Jr., « Nitrate concentration and ion balance in relation to citrus nutrition », *Hilgardia* (É.-U. A.), vol. 13, 1940, p. 141-173.
42. CHERMEZON, H., « Recherches anatomiques sur les plantes littorales », *Ann. Sci. Nat. Bot.*, sér. IX, 12, 1910, p. 117-125.
43. COLLANDER, R., « Selective absorption of cations by higher plants », *Plant Physiol.*, vol. 16, 1941, p. 691-720.
44. COOPER, W. C., et GORTON, B. S., « Relation of lead composition to leaf burn of avocados and other subtropical fruits », *Yearbook, Texas Avocado Society* (É.-U. A.), 1950, p. 32-38.
45. — « Salt tolerance of various citrus rootstocks », *Proc. 5th Ann. Rio Grande Valley Hort. Inst.* (É.-U. A.), 1951, p. 46-52.
46. DAVIS, R. O. E., et BRYAN, H., *The electrical bridge for the determination of soluble salts in soils*, 1910. (*U.S. Dept. Agr. Bur. Soils Bul.*, n° 61.)
47. DHIR, R. D., « Recherches hydrologiques dans les régions arides et semi-arides de l'Inde et du Pakistan », *Compte rendu des recherches effectuées sur l'hydrologie de la zone aride*, Paris, Unesco, 1952, p. 97-130.
48. DONEEN, L. D., et MCGILLIVRAY, J. H., « Germination (emergence) of vegetable seed as affected by different soil moisture conditions », *Plant. Physiol.*, vol. 18, 1943, p. 524-529.
49. DOUGHTY, J. L., et al., *Soil moisture, wind erosion and fertility of some Canadian prairie soils*, Soil Research Laboratory, Swift Current, Saskatchewan (Canada), 1949. (*Dept. Agr. Tech. Bul.*, n° 71.)
50. DOUGHTY J. L., et STALWICK, A. E., « The effect of alkali salts on plant growth », *Sci. Agr.*, vol. 20, 1940, p. 272-276.
51. EATON, F. M., « The water requirement and cell-sap concentration of Australian salt bush and wheat as related to the salinity of the soil », *Amer. Jour. Bot.*, vol. 14, 1927, p. 212-226.
52. — « Salinity of irrigation water and injury to crop plants », *California Citrograph*, vol. 20, 1935, p. 302, 322-326, 334, 362-365.
53. — *Boron in soils and irrigation waters and its effects on plants*, 1935. (*U.S. Dept. Agr. Tech. Bul.*, n° 448.)
54. — « Water uptake and root growth as influenced by inequalities in the concentration of the substrate », *Plant Physiol.*, vol. 16, 1941, p. 545-564.
55. — « Toxicity and accumulation of chloride and sulfate salts in plants », *Jour. Agr. Res.*, vol. 64, 1942, p. 357-399.
56. — « Significance of carbonates in irrigation waters », *Soil Sci.*, vol. 69, 1950, p. 123-133.
57. EATON, F. M., et RIGLER, N. E., « Effect of light intensity, nitrogen supply, and fruiting on carbohydrate utilization by the cotton plant », *Plant Physiol.*, vol. 20, 1945, p. 380-411.
58. EATON, F. M., et WILCOX, L. V., *The behavior of boron in soils*, 1939. (*U.S. Dept. Agr. Tech. Bul.*, n° 696.)
59. FIREMAN, M., CHANG, C. W., et HEALTON, L. W., *Soil investigations on the Tucumcari, New Mexico, irrigation project*, 1951. (*New Mexico Agr. Expt. Sta. Press Bul.*, n° 1054.)
60. FIREMAN, M., et HAYWARD, H. E., « Indicator significance of some shrubs in the Escalante Desert, Utah » *Bot. Gaz.*, 1952. Sous presse.
61. FIREMAN, M., et MAGISTAD, O. C., « Permeability of five western soils as affected by the percentage of sodium of the irrigation water », *Trans. Amer. Geophys. Union* (É.-U. A.), vol. 26, 1945, p. 91-94.
62. FIREMAN, M., MOGEN, C. A., et BAKER, G. O., *Characteristics of saline and alkali soils in the Emmett valley area*, 1950. (*Idaho Agr. Expt. Sta. Res. Bul.*, n° 17.)
63. FIREMAN, M., et REEVE, R. C., « Some characteristics of saline and alkali soils in Gem County, Idaho », *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, vol. 13, 1948, p. 494-498.

64. FIREMAN, M., et WADLEIGH, C. H., « A statistical study of the relation between pH and the exchangeable-sodium-percentage of western soils », *Soil Sci.*, vol. 71, 1951, p. 273-285.
65. FITTING, H., « Die Wasserversorgung und die osmotischen Durchverhältnisse der Wüstenpflanze », *Zeits. Bot.*, vol. 3, 1911, p. 209-275.
66. FREISE, F. W., « The drought region of northeastern Brazil », *Geographical Review*, vol. 28, 1938, p. 363-378.
67. GANGULEE, N., « The alkali soils of India », *Intern. Conf. Pedologie, 2nd Comm.*, 1924, Actes IV, p. 643-655.
68. GARDNER, Robert, *Some soil properties related to the sodium salt problem in irrigated soils*, 1945. (U.S. Dept. Agr. Tech. Bul., n° 902.)
69. GARNER, W. W., McMURTREY Jr., J. E., BOWLING, J. D., et MOSS, E. G., « Role of chlorine in nutrition and growth of the tobacco plant and its effect on the quality of the cured leaf », *Jour. Agr. Res.*, vol. 40, 1903, p. 627-648.
70. GAUCH, H. G., « Responses of the bean plant to calcium deficiency », *Plant Physiol.*, vol. 15, 1940, p. 1-21.
71. GAUCH, H. G., et MAGISTAD, O. C., « Growth of strawberry clover varieties and of alfalfa and Ladino clover as affected by salt », *Jour. Amer. Soc. Agron.*, vol. 35, 1943, p. 871-880.
72. GAUCH, H. G., et WADLEIGH, C. H., « The influence of saline substrates upon the absorption of nutrients by bean plants », *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, vol. 41, 1942, p. 365-369.
73. — « Effects of high salt concentration on growth of bean plants », *Bot. Gaz.*, vol. 105, 1944, p. 379-387.
74. — « Effect of high concentrations of sodium, calcium, chloride and sulfate on ionic absorption by bean plants », *Soil Sci.*, vol. 59, 1945, p. 139-153.
75. — « Salt tolerance and chemical composition of Rhodes and Dallis grasses grown in sand culture », *Bot. Gaz.*, vol. 112, 1951, p. 259-271.
76. GEDROIZ, K. K., *Complexe d'absorption du sol et cations absorbés comme base d'une classification génétique des sols* [en russe], Station agricole expérimentale de Nossov, doc. div., n° 38.
77. — « Exchangeable cations of the soil and plant : I. Relation of plant to certain cations fully saturating the soil exchange capacity », *Soil Sci.*, vol. 32, 1931, p. 51-63.
78. GOSS, A., et GRIFFIN, H. H., *Alkali in the Rio Grande and Animas valleys*, 1897. (New Mexico Agr. Expt. Sta. Bul., n° 22.)
79. GREENE, H., *Using salty land*, 1948. (Food and Agriculture Organization Studies, n° 3.)
80. GREGORY, F. G., et WOODFORD, H. K., « An apparatus for the study of the oxygen, salt and water uptake of various zones of the root, with some preliminary results with *Vicia faba* », *Ann. Bot. N. S.*, vol. 3, 1939, p. 147-154.
81. HAAS, A. R. C., et THOMAS, E. E., « Effect of sulphate on lemon trees », *Bot. Gaz.*, vol. 86, 1928, p. 345-354.
82. HARLEY, C. P., et LINDNER, R. C., « Observed responses of apple and pear trees to some irrigation waters of north central Washington », *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, vol. 46, 1945, p. 35-44.
83. HARPER, H. J., *Effect of chloride on physical appearance and chemical composition of leaves of pecans and other native Oklahoma trees*, 1946. (Oklahoma Agr. Expt. Sta. Tech. Bul., n° T-23.)
84. HARRIS, F. S., « Effect of alkali salts in soils on the germination and growth of crops », *Jour. Agr. Res.*, vol. 5, 1915, p. 1-53.
85. — *Soil alkali*, New York, Wiley, 1920, 258 pages.
86. HARRIS, F. S., et PITTMAN, D. W., « Soil factors affecting the toxicity of alkali », *Jour. Agr. Res.*, vol. 15, 1918, p. 287-319.
87. — *Relative resistance of various crops to alkali*, 1919. (Utah Agr. Expt. Sta. Bul., n° 168.)
88. HARRIS, J. A., GORTNER, R. A., HOFFMAN, W. F., LAWRENCE, J. V., et VALENTINE, A. T., « The osmotic concentration, specific electrical conductivity and chloride content of tissue fluids of the indicator plants of Tooele valley, Utah », *Jour. Agr. Res.*, 1924, vol. 27, p. 893-924.
89. HARRIS, J. A., HOFFMAN, C. T., et HOFFMAN, W. F., « Sulphate content of the leaf-tissue fluids of Egyptian and Upland cotton », *Jour. Agr. Res.*, vol. 31, 1925, p. 653-661.
90. HARRIS, J. A., HOFFMAN, W. F., SINCLAIR, W. B., JOHNSON, A. H., et EVANS, R. D., « The leaf-tissue fluids of Egyptian cottons », *Jour. Agr. Res.*, 1925, vol. 31, p. 1027-1033.
91. HARRIS, J. A., LAWRENCE, J. V., et GORTNER, R. A., « The cryoscopic constants of expressed vegetable saps as related to local environmental conditions in Arizona deserts », *Physiol. Researches*, vol. 2, 1916, p. 1-49.
92. HAYWARD, H. E., « The control of salinity », *U.S. Dept. Agr. Yearbook*, 1943-1947, p. 547-553.
93. HAYWARD, H. E., et LONG, E. M., « Anatomical and physiological responses of the tomato to varying concentrations of sodium chloride, sodium sulfate, and nutrient solutions », *Bot. Gaz.*, vol. 102, 1941, p. 437-462.
94. — « Some effects of sodium salts on the growth of the tomato », *Plant Physiol.*, vol. 18, 1943, p. 556-569.
95. HAYWARD, H. E., LONG, E. M., et UHVITS, R., *Effect of chloride and sulfate salts on the growth and development of the Elberta peach on Shalil and Lovell rootstocks*, 1946. (U.S. Dept. Agr. Tech. Bul., n° 922.)
96. HAYWARD, H. E., et MAGISTAD, O. C., *The salt problem in irrigation agriculture*, 1946. (U.S. Dept. Agr. Misc. Pub., n° 607.)
97. HAYWARD, H. E., et SPURR, W. B., « Effects of osmotic concentration of substrate on the entry of water into corn roots », *Bot. Gaz.*, vol. 105, 1943, p. 152-164.
98. — « Effects of isosmotic concentrations of inorganic and organic substrates on entry of water into corn roots », *Bot. Gaz.*, vol. 106, 1944, p. 131-139.
99. — « The tolerance of flax to saline conditions : Effect of sodium chloride, calcium chloride and sodium sulfate », *Jour. Amer. Soc. Agron.*, vol. 36, 1944, p. 287-300.
100. HAYWARD, H. E., et WADLEIGH, C. H., « Plant growth on saline and alkali soils », *Adv. in Agronomy*, vol. 1, 1949, p. 1-38.
101. HEADDEN, W. P., *Deterioration in the quality of sugar beets due to nitrates formed in the soil*, 1912. (Colorado Agr. Expt. Sta. Bul., n° 183.)
102. — *Alkalis in Colorado*, 1918. (Colorado Agr. Expt. Sta. Bul., n° 239.)
103. HEALD, W. R., MOODIE, C. D., et LEAMER, R. W., *Leaching and pre-emergence irrigation for sugar beets on saline soils*, 1950. (Washington Agr. Expt. Sta. Bul., n° 519.)
104. HELLER, V. G., HAGEMAN, R. H., et HARTMAN, E. L., « Sand culture studies of the use of saline and alkaline waters in greenhouses », *Plant Physiol.*, vol. 15, 1940, p. 727-733.

105. HELLER, V. G., HAGEMAN, R. H., et HARTMAN, E. L., « The use of saline and alkali waters in greenhouses », *Proc. Oklahoma Acad. Sci.*, vol. 20, 1940, p. 59-62.
106. HENDRICKSON, A. H., et VEIHMAYER, F. J., *Irrigation experiments with peaches in California*, 1929. (*California Agr. Expt. Sta. Bul.*, n° 479.)
107. — *Irrigation experiments with pears and apples*, 1942. (*California Agr. Expt. Sta. Bul.*, n° 667.)
108. HERNANDEZ, Alfonso, « El agua en el suelo », *Agronomia*, Mexico, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, vol. 17, 1951, p. 2-3.
109. HILGARD, E. W., « Alkali lands, irrigation and drainage in their mutual relations », *California Agr. Expt. Sta.*, appendix to rept. for 1890, 1892.
110. — *Soils*, New York, McMillan Co., 1906. 593 pages.
111. HILL, R. A., « Salts in irrigation waters », *Trans. Amer. Soc. Civil Eng.* (É.-U. A.), paper n° 2165, vol. 107, 1942, p. 1477-1518.
112. HOON, R. C., et MEHTA, M. L., « A study of the soil profiles of the Punjab plains with reference to their natural flora », *Punjab Irrig. Res. Inst. Pub.*, vol. 3, n° 3, 1937.
113. HUNTER, J. R., et ERICKSON, A. E., « Relation of seed germination to soil moisture tension », *Agron. Jour.*, vol. 44, 1952, p. 107-109.
114. ILJIN, W. S., « Physiologischer Pflanzenschutz gegen schädliche Wirkung von Salzen », *Biochem. Zeits.*, vol. 132, 1922, p. 526-540.
115. — « Anpassung der Halophyten an Konzentrierte Salzlösungen », *Planta* (Allemagne), vol. 16, 1932, p. 352-366.
116. JAMES, P. E., *Latin America*, New York, Lothrop, Lee and Shepard, 1942, 908 pages.
117. JENSEN, M. C., LEWIS G. C., et BAKER, G. O., *Characteristics of irrigation waters in Idaho*, 1951. (*Idaho Agr. Expt. Sta. Res. Bul.*, n° 19.)
118. KAPP, L. C., *The effect of common salt on rice production*, 1947. (*Arkansas Agr. Expt. Sta. Bul.*, n° 465.)
119. KEARNEY, T. H., *Choice of crops for alkali land*, 1911. (*U.S. Dept. Agr. Farmers Bul.*, n° 446.)
120. KEARNEY, T. H., BRIGGS, J. J., SHANTZ, H. L., McLANE, J. W., et PIEMEISAL, R. L., « Indicator significance of vegetation in Tooele valley, Utah », *Jour. Agr. Res.*, 1914, vol. 1, p. 365-417.
121. KEARNEY, T. H., et HARTER, L. L., *The comparative tolerance of various plants for the salts common in alkali soils*, 1907. (*U.S. Dept. Agr. Bur. Plant Industry Bul.*, n° 113.)
122. KEARNEY, T. H., et SCOTFIELD, C. S., *The choice of crops for saline land.*, 1936. (*U.S. Dept. Agr. Circ.*, n° 404.)
123. KELLER, B., « Halophyten und Xerophytenstudien », *Jour. Ecol.*, vol. 13, 1925, p. 224-261.
124. KELLEY, W. P., « A general discussion of the chemical and physical properties of alkali soils », *First Intern. Cong. Soil. Sci. Proc.*, vol. 4, 1927, p. 483-489.
125. — « Alkali soils, their formation, properties and reclamation », New York, Reinhold, 1951, 176 pages.
126. KELLEY, W. P., et THOMAS, E. E., *The effects of alkali on citrus trees*, 1920. (*California Agr. Expt. Sta. Bul.*, n° 318.)
127. KOHNLEIN, E., « Untersuchungen über die Höhe des Wurzelwiderstandes und die Bedeutung aktiver Wurzel-tätigkeit für die Wasserversorgung der Pflanzen », *Planta* (Allemagne), vol. 10, 1930, p. 381-423.
128. KOVDA, B. A., et MAMYEVA, L. Y., « Limits of toxicity of salts in soils of Pakta-Aral (Hungary) steppe for alfalfa and cotton », *Pedology* (U.R.S.S.), vol. 4, 1939, p. 80-98.
129. KOWDA, V. A., « Die typen der Alkaliböden (Solontzi) », *Third Intern. Cong. Soil Sci. Proc.*, vol. 3, 1935, p. 99-102.
130. LARSON, C. A., *Reclamation of saline (alkali) soil in the Yakima valley*, 1939. (*Washington Agr. Expt. Sta. Bul.*, n° 376.)
131. LEATHER, J. W., *Investigation of usar land in the United Provinces*, Allahabad, Indian Govt., 1914, 88 pages.
132. LEHR, J. J., « The importance of sodium for plant nutrition : III. The equilibrium of cations in the beet », *Soil Sci.*, vol. 53, 1942, p. 399-411.
133. LEONARD, O. A., ANDERSON, W. S., et GIEGER, M., « Effect of nutrient level on the growth and chemical composition of sweet potatoes in sand cultures », *Plant Physiol.*, vol. 23, 1948, p. 223-237.
134. LILLELAND, O., BROWN, J. G., et SWANSON, C., « Research shows sodium may cause leaf-tip burn », *Almond Facts*, vol. 9, 1945, p. 1, 5.
135. LONG, E. M., « The effect of salt additions to the substrate on intake of water and nutrients by roots of approach-grafted tomato plants », *Amer. Jour. Bot.*, vol. 30, 1943, p. 594-601.
136. LOUGHRIDGE, R. H., *Tolerance of alkali by various cultures*, 1906. (*California Agr. Expt. Sta. Bul.*, n° 133, édition revue et corrigée.)
137. LUNDEGÄRDH, H., « Investigations as to the absorption and accumulation of inorganic ions », *LantbrHögsk. Ann.*, vol. 8, 1940, p. 234-404.
138. LYON, C. B., « Responses of two species of tomatoes and the F₁ generation to sodium sulphate in the nutrient medium », *Bot. Gaz.*, vol. 103, 1941, p. 107-122.
139. McGEORGE, W. T., *Some aspects of citrus tree decline as revealed by soil and plant studies*, 1936. (*Arizona Agr. Expt. Sta. Tech. Bul.*, n° 60.)
140. — *Sulphur, a soil corrective and soil builder*, 1945. (*Arizona Agr. Expt. Sta. Bul.*, n° 201.)
141. MCGREGOR, J. M., et WYATT, F. A., « Studies of solonetz soils of Alberta », *Soil Sci.* vol. 59, 1945, p. 419-435
142. MCKEE, Roland, *Australian salibush*, 1919. (*U.S. Dept. Agr. Bul.*, n° 617.)
143. MCKENZIE, R. E., et BOLTON, J. L., « Crop production on irrigated heavy textured saline soils with particular reference to the Val Marie irrigation project », *Sci. Agr.*, vol. 27, 1947, p. 193-219.
144. MAGISTAD, O. C., « Plant growth relations on saline and alkali soils », *Bot. Rev.*, vol. 11, 1945, p. 181-230.
145. MAGISTAD, O. C., AYERS, A. D., WADLEIGH, C. H., et GAUCH, H. G., « Effect of salt concentration, kind of salt, and climate on plant growth in sand cultures », *Plant Physiol.*, vol. 18, 1943, p. 151-166.
146. MAGISTAD, O. C., et CHRISTIANSEN, J. E., *Saline soils, their nature and management*, 1944. (*U.S. Dept., Agr. Circ.*, n° 707.)
147. MAGISTAD, O. C., et REITEMEIER, R. F., « Soil solution concentrations at the wilting point and their correlation with plant growth », *Soil Sci.*, vol. 55, 1943, p. 351-360.
148. MANN, H. H., et TAMHANE, V. A., *The salt lands of the Nira valley (Inde)*, 1910. (*Dept. Agr. Bombay, Bul.*, n° 39.)
149. MARSHALL, J. B., « Some observations on the tolerance of salinity by cereal crops in Saskatchewan », *Sci. Agr.*, vol. 22, 1942, p. 492-502.
150. MARSHALL, J. B., et PALMER, A. E., « Changes in the nature and position of the soluble salts in certain Alberta

- soils after twenty years of irrigation », *Sci. Agr.*, vol. 19, 1939, p. 271-278.
151. MASAÉWA, M., « Zur Frage der Chlorophobie der Pflanzen », *Bodenk. PflErnähr.*, vol. 1, 1936, p. 39-56.
 152. MEHTA, M. L., « The soils of the rice areas of the Gujranwala and Sheikhpura divisions of the upper Chenab canal », *Punjab. Irrig. Res. Inst. Pub.*, vol. 3, n° 2, 1937.
 153. — « The formation and reclamation of thur lands in the Punjab », *Punjab Irrig. Res. Inst. Pub.*, vol. 3, n° 4, 1940.
 154. MIBASHAN, A., *Survey of literature on the influence of ions on plants and soils*, Jérusalem, R.S.I.R., Government of Palestine, 1948.
 155. MILLINGTON, A. J., BURVILL, G. H., et MARSH, B. A'B., *Soil salinity investigations, salt tolerance, germination and growth tests under controlled salinity conditions*, 1951. (Dept. of Agr. West. Australia, leaflet n° 1052.)
 156. MITCHELL, J., « Alkali soils in Saskatchewan », *Sci. Agr.*, vol. 18, 1937, p. 120-125.
 157. MITCHELL, J., et MOSS, H. C., « The soils of the Canadian section of the Great Plains », *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, vol. 13, 1948, p. 431-437.
 158. MIYAKE, K., « The influence of salts common in alkali soils upon the growth of the rice plant », *Jour. Biol. Chem.*, vol. 16, 1913, p. 235-263.
 159. MULWANI, B. T., et POLLARD, A. G., « Effect of alkali salts on germination of seeds », *Agr. Livestock (Inde)*, 1940, vol. 9, p. 548-555; *Chem. Abstr.*, vol. 34, 1940, p. 1939, 2026.
 160. NEIDIG, R. E., et MAGNUSON, H. P., « Alkali studies : I. Tolerance of wheat for alkali in Idaho soil », *Soil Sci.*, vol. 18, 1924, p. 449-467.
 161. — « Alkali studies : II. Tolerance of alfalfa, corn and sweet clover for alkali in Idaho soil », *Soil Sci.*, vol. 19, 1925, p. 115-124.
 162. — « Alkali studies : III. Tolerance of barley for alkali in Idaho soil », *Soil Sci.*, vol. 20, 1925, p. 367-391.
 163. — « Alkali studies : IV. Tolerance of oats for alkali in Idaho soil », *Soil Sci.*, vol. 20, 1925, p. 425-441.
 164. NIGHTINGALE, G. T., et FARNHAM, R. B., « Effects of nutrient concentration on the anatomy, metabolism and bud abscission of sweet peas », *Bot. Gaz.*, vol. 97, 1936, p. 477-517.
 165. ODYNSKY, W., « Solonetz soils in Alberta », *Sci. Agr.*, vol. 25, 1945, p. 780-790.
 166. OGASA, T., « Effect of alkaline salts on the germination of seeds. I : Effect of NaCl solutions on the germination of soy beans, especially on the influence at high and low temperatures », *Rept. Inst. Sci. Res. Manchoukuo (Japon)*, vol. 3, 1939, p. 303-315; *Chem. Abstr.*, vol. 36, 1942, p. 2588.
 167. OSTERHOUT, W. J. V., « The nature of balance solutions », *Bot. Gaz.*, vol. 47, 1909, p. 143-149.
 168. — « The permeability of protoplasm to ions and the theory of antagonism », *Science (É.-U. A.)*, vol. 35, 1912, p. 156-157.
 169. PALMER, A. E., « Kind, position and toxicity of alkali salts in certain Alberta irrigated soils, and tolerance of crops for these salts », *Sci. Agr.*, vol. 18, 1937, p. 132-140.
 170. PENMAN, F., HUBBLE, G. D., TAYLOR, J. K., et al., *A soil survey of the Mildura irrigation settlement, Victoria*, 1940. (*Counc. Sci. Ind. Res. Aust. Bul.*, n° 133.)
 171. PENMAN, F., et PROVAN, J. L., « Defoliation of citrus », *Jour. Dept. Agr. Victoria (Australie)*, 1936, 8 pages.
 172. PENMAN, F., TAYLOR, J. K., HOOPER, P. D., et al., *A soil survey of the Merbein irrigation district, Victoria*, 1939. (*Counc. Sci. Ind. Res. Aust. Bul.*, n° 123.)
 173. PENNEFATHER, R. R., *Our soil salinity problems*, Western Mail (Australie), 12 juillet 1951.
 174. PERKINS, A. J., « When is water safe for irrigation purposes? », *Journ. Agr. S. Austr.*, vol. 27, 1923, p. 442-454.
 175. POWERS, W. L., *Reclamation and use of alkali soils*, 1946. (*Oregon Agr. Expt. Sta. Tech. Bul.*, n° 10.)
 176. PRESCOTT, J. A., *The soils of Australia in relation to vegetation and climate*, 1931. (*Counc. Sci. Ind. Res. Aust. Bul.*, n° 52.)
 177. — *A soil map of Australia*, 1944. (*Counc. Sci. Ind. Res. Austr. Bul.*, n° 177.)
 178. PRESCOTT, J. A., et PIPER, C. S., « Soils of the South Australian Mallee », *Trans. Royal Soc. S. Austr.*, 1932, vol. 56, p. 118.
 179. PUERTAS FABILA, J. L., « Suelos alcalinos », *Agronomai Bul.*, Mexico, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, vol. 5, 1949, p. 3-4.
 180. PURI, A. N., « The relation between exchangeable sodium and crop yield in Punjab soils and a new method of characterizing alkali soils », *Punjab Irrig. Res. Inst. Res. Publ.*, 4, 1934, p. 1-4.
 181. PURI, A. N., TAYLOR, E. M., et ASGHAR, A. G., « Soil deterioration in the canal-irrigated areas of the Punjab. Part III. Formation and characteristics of soil profiles in alkaline alluvium of the Punjab », *Punjab Irrig. Res. Inst. Res. Publ.*, vol. 9, n° 4, 1937.
 182. RATNER, E. I., « The influence of exchangeable sodium in the soil on its properties as a medium for plant growth », *Soil Sci.*, vol. 40, 1935, p. 459-471.
 183. — « The physiological effect of soil alkalinity and the ameliorative role of the root systems of plants on solonetz », *Pedology (É.-U.A.)*, vol. 4-5, 1944, p. 205-227.
 184. RAVIKOVITCH, S., et BIDNER, N., « The deterioration of grape vines in saline soils », *Empire Jour. Exptl. Agr.*, vol. 5, 1937, p. 197-203.
 185. — « Effects of soil salinity on clover in the Yezreel valley », *Empire Jour. Exptl. Agr.*, vol. 8, 1940, p. 207-214.
 186. REEVE, R. C., ALLISON, L. E., et PETERSON Jr., D. F., *Reclamation of saline-alkali soils by leaching, Delta area, Utah*, 1948. (*Utah. Agr. Expt. Sta. Bul.*, n° 335.)
 187. RICHARDS, L. A., « Chemical and physical characteristics of saline and alkali soils of western United States », *Trans. Intern. Cong. Soil Sci.*, Amsterdam, vol. 1, 1950, p. 1-6.
 188. RICHARDS, L. A., et WADLEIGH, C. H., « Soil water and plant growth » dans la monographie *Influence of soil physical conditions on plant growth (É.-U.A.)*, Amer. Soc. Agron. chap. III, 1952, p. 73-251.
 189. RICHARDS, L. A., et WEAVER, L. R., « Fifteen-atmosphere-percentage as related to the permanent wilting percentage », *Soil Sci.*, vol. 56, 1943, p. 331-339.
 190. — « Moisture retention by some irrigated soils as related to soil moisture tension », *Jour. Agr. Res.*, vol. 69, 1944, p. 215-235.
 191. ROBLES GUTIERREZ, L., « Sorgo para clima semi-desértico », *Agronomia*, Mexico, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, vol. 20, 1952, p. 2-3.
 192. ROSENE, H. F., « Control of water transport in local root regions of attached and isolated roots by means of the osmotic pressure of the external solution », *Amer. Journ. Bot.*, vol. 28, 1941, p. 402-410.

193. RUDOLFS, W., « Effect of salt solutions having definite osmotic concentration values upon absorption by seeds », *Soil Sci.*, vol. 11, 1921, p. 277-293.
194. — « Influence of water and salt solution upon absorption and germination of seeds », *Soil Sci.*, vol. 20, 1925, p. 15-37.
195. SACKETT, W. G., et ISHAM, R. M., « Origin of the nitre spots in certain western soils », *Science, new series* (É.-U.A.), vol. 42, 1915, p. 452-453.
196. SAMPSON, A. W., « Plant indicators, concept and status », *Bot. Rev.*, vol. 5, 1939, p. 155-206.
197. SCHIMPER, A. F. W., et FABER, F. C. VON, *Pflanzengeographie auf physiologischer Grundlage*, 3. aufl. (Allemagne), 1935, 1.023 pages.
198. SCHUPHAN, W., « L'influence des engrais à base de chlorures et de sulfates sur le rendement, la valeur commerciale et la valeur biologique de quelques légumes compte tenu des facteurs édaphiques et climatologiques », *Bodenk. PflErnähr.*, vol. 19, 1940, p. 265-315.
199. SCOFIELD, C. S., « Salt balance in irrigated areas », *Jour. Agr. Res.*, vol. 61, 1940, p. 17-39.
200. — *Reports of participating agencies*, National Resources Planning Board (É.-U.A.), 1942, part III, sec. 6, p. 263-334.
201. SCOFIELD, C. S., et HEADLEY, F. B., « Quality of irrigation water in relation to land reclamation », *Jour. Agr. Res.*, vol. 21, 1921, p. 265-278.
202. SCOFIELD, C. S., et WILCOX, L. V., *Boron in irrigation waters*, 1931. (U.S. Dept. Agr. Tech. Bul., n° 264.)
203. SHANTZ, H. L., et PIEMEISEL, R. L., « Indicator significance of the natural vegetation of the southwestern desert region », *Jour. Agr. Res.*, vol. 28, 1924, p. 721-802.
204. SHAW, G. W., *Tolerance of the sugar beet for alkali*, 1905. (California Agr. Expt. Sta. Bul., n° 169.)
205. SHIVE, J. W., « The effect of salt concentration on the germination of seeds », *New Jersey Agr. Expt. Sta., 37th annual Rept.*, 1916, p. 455-457.
206. SIGMOND, A. A. J. DE, « The classification of alkali and salty soils », *First Intern. Cong. Soil Sci. Proc.*, vol. 1, 1927, p. 330-344.
207. — *The principles of soil science*, Londres, Thomas Murby, 1938, 362 pages.
208. SLOSSON, E. E., et BUFFUM, B. C., *Alkali studies II*, 1898. (Wyoming Agr. Expt. Sta. Bul., n° 39.)
209. SNYDER, R. S., KULP, M. R., BAKER, G. O., et MARR, J. C., *Alkali reclamation investigations*, 1940 (Idaho Agr. Expt. Sta. Bul., n° 233.)
210. SOIL SURVEY STAFF, *Soil survey manual*, U. S. Dept. Agr., 1951, 503 pages. (Handbook n° 18.)
211. STABLER, H., *Some stream waters of the western United States*, Geol. Survey, U.S. Dept. of Interior, 1911. (Water Supply Paper n° 274.)
212. STEWARD, F. C., et PRESTON, C., « Effects of pH and the components of bicarbonate and phosphate buffered solutions on the metabolism of potato discs and their ability to absorb ions », *Plant Physiol.*, vol. 16, 1941, p. 481-519.
213. STEWART, G., et COTTAM, W. P., « Influence of unrestricted grazing on northern salt desert plant associations in western Utah », *Jour. Agr. Res.*, vol. 60, 1940, p. 289-316.
214. STEWART, J., « Effect of alkali on seed germination », *Utah Agr. Expt. Sta, 9th Annual Rept.*, 1898, p. 26-35.
215. STEWART, R., et PETERSON, W., « The origin of 'nitre spots' in certain western soils », *Jour. Amer. Soc. Agron.*, vol. 6, 1915, p. 241-248.
216. STORIE, R. E., et MATHEWS, Carlos, « Preliminary study of Chilean soils », *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, vol. 10, 1945, p. 351-355.
217. TAGAWA, T., « The relation between the absorption of water by plant root and the concentration and nature of the surrounding solution », *Jour. Bot.* (Japon), vol. 7, 1934, p. 33-60.
218. TAMHANE, V. A., *Investigations into the nature of the salt lands of Sind* (Inde), 1920. (Dept. of Agr. Bombay Bul., n° 96.)
219. TAYLOR, E. M., PURI, A. N., et ASGHAR, A. G., « Soil deterioration in the canal-irrigated areas of the Punjab. Part I. Equilibrium between Ca and Na ions in base exchange reactions », *Punjab Irrig. Res. Inst. Res. Publ.*, 4, n° 7, 1934.
220. TAYLOR, J. K., PENMAN, F., et al., *A soil survey of the Nyah, Tresco, Tresco West, Kangaroo lake (Vic.) and Goodnight (N.S.W.) settlements*, 1933. (Counc. Sci. Ind. Res. Austr. Bul., n° 73.)
221. TEAKLE, L. J. H., « The salt (sodium chloride) content of rainwater », *Jour. Agr. West. Austr.*, vol. 14, 1937, p. 115-123.
222. — « An interpretation of some 'solonized' (alkali) soils in southwestern Western Australia », *Trans. Intern. Cong. Soil Sci.*, Amsterdam, vol. 1, 1950, p. 389-393.
223. THOMAS, J. E., « The diagnostic value of the chlorine content of the vine leaf », *Jour. Counc. Sci. Ind. Res. Austr.*, vol. 7, 1934, p. 29-38.
224. — An investigation of problems of salt accumulation on a Mallee soil in the Murray valley irrigation area, 1939. (Counc. Sci. Ind. Res. Austr. Bul., n° 128.)
225. THORNE, D. W., « Growth and nutrition of tomato plants as influenced by exchangeable sodium, calcium and potassium », *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, vol. 9, 1944, p. 185-189.
226. THORNE, J. P., et THORNE, D. W., *Irrigation waters of Utah*, 1951. (Utah Agr. Expt. Sta. Bul., n° 346.)
227. TINSLEY, J. D., *Alkali* (É.-U.A.), 1902. (New Mexico Agr. Expt. Sta. Bul., n° 42.)
228. TREALEASE, S. F., et TREALEASE, H. M., « Magnesium injury of wheat », *Torrey Botan. Club Bul.* 58 (É.-U.A.), 1931, p. 127-148.
229. UHVITS, R., « Effect of osmotic pressure on water absorption and germination of alfalfa seeds », *Amer. Jour. Bot.*, vol. 33, 1946, p. 278-285.
230. U.S. SALINITY LABORATORY, *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*, L. A. Richards, editor (É.-U.A.), 1947, 157 pages.
231. UEHOF, J. C. Th., « Halophytes », *Bot. Rev.*, vol. 7, 1941, p. 1-58.
232. VAN EIJK, M., « Analyse der Wirkung des NaCl auf die Entwicklung, Sukkulenz und Transpiration bei *Salicornia herbacea*, sowie Untersuchungen über den Einfluss der Salzaufnahme auf die Wurzelatmung bei *Aster tripolium* », *Rec. Trav. Bot. Neerland*, vol. 36, 1939, p. 559-657.
233. VAN ITALLIE, Th. B., « Cation equilibria in plants in relation to the soil », *Soil Sci.*, vol. 46, 1938, p. 175-186.
234. VEIHMAYER, F. J., « Some factors affecting the irrigation requirements of deciduous orchards », *Hilgardia* (É.-U.A.), vol. 2, 1927, p. 125-287.
235. VEIHMAYER, F. J., et HENDRICKSON, A. H., « Soil moisture conditions in relation to plant growth », *Plant Physiol.*, vol. 2, 1927, p. 71-82.
236. VESSEL, A. J., « Soil association areas of Argentina and Chile », *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, vol. 11, 1946, p. 464-473.

237. WADLEIGH, C. H., « The integrated soil moisture stress upon a root system in a large container of saline soil », *Soil Sci.*, vol. 61, 1946, p. 225-238.
238. WADLEIGH, C. H., et AYERS, A. D., « Growth and biochemical composition of bean plants as conditioned by soil moisture tension and salt concentration », *Plant Physiol.*, vol. 20, 1945, p. 106-132.
239. WADLEIGH, C. H., et BROWN, J. W., « The chemical status of bean plants afflicted with bicarbonate-induced chlorosis », *Bot. Gaz.*, 1952. Sous presse.
240. — « Influence of sodium bicarbonate on mineral composition of red garden beets », *Proc. Amer. Assoc. Sugar Beet Technologists (É.-U.A.)*, 1952. Sous presse.
241. WADLEIGH, C. H., et FIREMAN, M., « Salt distribution under furrow and basin irrigated cotton and its effect on water removal », *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, vol. 13, 1948, p. 527-530.
242. WADLEIGH, C. H., et GAUCH, H. G., « Assimilation in bean plants of nitrogen from saline solutions », *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, vol. 41, 1942, p. 360-364.
243. — « The influence of high concentrations of sodium sulfate, sodium chloride and magnesium chloride on the growth of guayule in sand culture », *Soil Sci.*, vol. 58, 1944, p. 399-403.
244. — « Rate of leaf elongation as affected by the intensity of the total soil moisture stress », *Plant Physiol.*, vol. 23, 1948, p. 485-495.
245. WADLEIGH, C. H., GAUCH, H. G., et KOLISCH, M., « Mineral composition of orchard grass grown on Pachappa loam salinized with various salts », *Soil. Sci.* vol. 72, 1951, p. 275-282.
- WADLEIGH, C. H., GAUCH, H. G., et MAGISTAD, O. C., *Growth and rubber accumulation in guayule as conditioned by soil salinity and irrigation regime*, 1946. (U.S. Dept. Agr. Tech. Bul., n° 925.)
247. WADLEIGH, C. H., GAUCH, H. G., et STRONG, D. C., « Root penetration and moisture extraction in saline soil by crop plants », *Soil Sci.*, vol. 63, 1947, p. 341-349.
248. WADLEIGH, C. H., HAYWARD, H. E., et AYERS, A. D., « First year growth of stone fruit trees on saline substrates », *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, vol. 57, 1951 p. 31-36.
249. WALLACE, A., TOTH, S. J., et BEAR, F. E., « Sodium content of some New Jersey plants », *Soil Sci.*, vol. 65, 1948, p. 249-258.
250. WALSH, T., et CLARKE, E. J., « A chlorosis of tomatoes », *Eire Dept., Agr. Journ (Irlande)*, vol. 39, 1942, p. 316-325.
251. WARD, L. K., *Occurrence, composition and utilization of underground water in South Australia*, 1946. (*Geological Survey of South Australia Bul.*, n° 23.)
252. WILCOX, J. C., « Determination of electrical conductivity of soil solution », *Soil Sci.*, vol. 63, 1947, p. 107-117.
253. WILCOX, L.V., *The quality of water for irrigation use*, 1948. (U.S. Dept. Agr. Tech. Bul., n° 962.)
254. WILCOX, L. V., SCOFIELD, C. S., HOWARD, C. S., BOWER, C. A., WADLEIGH, C. H., et HAYWARD, H. E., « Water for irrigation use », *Chem. and Eng. News*, vol. 29, 1951, p. 990-993.
255. WUHRMAN, K., *Die Ionenaufnahme der Pflanzen und ihre morphogenetische Wirkung*, Eidg. Tech. Hochschule, Zurich, 1935.
256. WYATT, F. A., NEWTON, J. D., BOWSER, W. E., et ODYNSKY, W., *Soil survey of blackfoot and Calgary Sheets (Canada)*, 1942. (*Univ. Alberta Bul.*, n° 39.)

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ABRÉVIATIONS UTILISÉES DANS LES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Agr. = agriculture, agricole.	Exptl. = expérimental.
Ann. = annales.	Jour. = journal.
Austr. = Australie, australien.	Proc. = proceedings (Actes).
Bot. = botanique.	Pub. = publication.
Bul. = bulletin.	Res. = recherche.
Circ. = circulaire.	Sci. = science, scientifique.
Dept. = département.	Tech. = technique.
Expt. = expérience.	Trans. = transactions (travaux).

TITRES DES PÉRIODIQUES

Titre abrégé	Titre complet	Pays d'édition
Agr. Expt. Sta. Bul.	Agricultural experiment station bulletin (précédé du nom de l'État)	É.-U.A.
Agron. Jour.	Agronomy journal	É.-U.A.
Amer. Jour. Bot.	American journal of botany	É.-U.A.
Ann. Agron. Ser. A.	Annales agronomiques, séries A	France
Ann Bot. N.S.	Annals of botany, new series	Grande-Bretagne
Ann. Sci. Nat. Bot.	Annales des sciences naturelles : botanique	France
Biochem. Zeits.	Biochemisch Zeitschrift	Allemagne
Bodenk. PflErnähr.	Bodenkunde und Pflanzenernährung	Allemagne

Bot. Gaz.	Botanical gazette	É.-U.A.
Bot. Rev.	Botanical review	É.-U.A.
Calif. Agr.	California agriculture	É.-U.A.
Chem. Abstr.	Chemical abstracts	É.-U.A.
Chem. & Eng. News	Chemical and engineering news	É.-U.A.
Counc. Sci. Ind. Res. Austr.	Council of Scientific and Industrial Research of Australia	Australie
Dept. Agr. Tech. Bul.	Department of Agriculture Technical bulletin	Australie, Canada, É.-U.A. etc.
Empire Jour. Exptl. Agr.	Empire journal of experimental agriculture	Grande-Bretagne
Ind. Jour. Agr. Sci.	India journal of agricultural science	Inde
Intern. Conf. Pedologie, 2nd comm.	International Conference, « Pedologie », 2nd comm.	Italie
Intern. Congr. Soil Sci. Proc.	Proceedings of International Soil Science Congress	
Jour. Agr. Res	Journal of agricultural research	É.-U.A.
Jour. Amer. Soc. Agron.	Journal of the American Society of Agronomy	É.-U.A.
Jour. Biol. Chem.	Journal of biological chemistry	É.-U.A.
Jour. Dept. Agr. West. Austr.	Journal of the Department of Agriculture of Western Australia	Australie
Jour. Ecol.	Journal of ecology	É.-U.A.
LantbrHögsk. Ann.	Lantbruks-Högskolans Annaler	Suède
Plant Physiol.	Plant physiology	É.-U.A.
Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.	Proceedings of the American Society of Horticultural Science	É.-U.A.
Punjab Irrig. Res. Inst. Publ.	Punjab Irrigation Research Institute publication	Pakistan
Rec. Trav. Bot. Neerland	Recueils de travaux botaniques néerlandais	Pays-Bas
Sci. Agr.	Scientific agriculture	Canada
Soil Sci.	Soil science	É.-U.A.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc.	Proceedings of the Soil Science Society of America	É.-U.A.
Trans. Intern. Cong. Soil Sci.	Transactions of the International Congress of Soil Science	
Zeits. Bot.	Zeitschrift Botanik	Allemagne

L'UTILISATION DE L'EAU DE MER

par

EVERETT D. HOWE,
Université de Californie, Berkeley, Californie

GÉNÉRALITÉS - APERÇU HISTORIQUE

Il y a longtemps que la possibilité d'utiliser l'eau de mer pour faire vivre animaux et plantes retient l'attention des chercheurs, surtout en ce qui concerne les régions côtières arides ou semi-arides, et pour les voyages maritimes au long cours. Cette utilisation est possible soit moyennant la transformation de l'eau de mer en eau douce, soit grâce à une évolution des plantes et des animaux les mettant à même d'utiliser l'eau de mer telle quelle. Le présent article ne traite que de la transformation de l'eau de mer en eau douce, puisque l'adaptation des organismes vivants à son utilisation fait l'objet d'autres études.

L'utilisation de l'eau de mer est beaucoup plus commune sur les navires qu'à terre, principalement parce qu'en mer il n'y a pas d'autre moyen de se procurer de l'eau, tandis que la plupart des régions continentales habitées sont alimentées en eau douce. La question du prix de revient est ici subordonnée à l'impérieuse nécessité d'avoir de l'eau : ce prix n'est jamais trop élevé lorsque la vie humaine est en jeu, ce qui est le cas en mer, alors qu'à terre les sécheresses n'ont souvent d'autre effet que d'interdire le lavage des automobiles ou l'arrosage des parterres de fleurs, et ne mettent qu'assez rarement la vie humaine en danger.

Nul ne sait à quelle date on réussit pour la première fois, en mer, à transformer l'eau salée en eau potable, mais il est probable que ce fut deux siècles au moins avant que Coleridge écrivît son célèbre distique :

Water, water everywhere
Nor any drop to drink¹

Hampel [165]², qui a étudié cette question, cite des textes d'où il ressort que la distillation se pratiquait dès 1593, date à laquelle sir Richard Hawkins aurait

employé un alambic pour s'approvisionner en eau douce lors de son voyage vers les mers du Sud. D'autres textes cités par le même auteur [11, 120, 161, 164, 269, 282] permettent de suivre dans son évolution l'emploi de l'alambic simple sur les navires jusqu'à la fin du XVIII^e siècle. A l'époque de la navigation à voile, l'eau distillée était entièrement réservée à la consommation humaine. Le matériel était sommaire, et consistait généralement, d'après Chapman [120], en « ... un alambic très simple, placé sur le feu de la cuisine, à côté du réservoir à eau chaude du bord. C'était un chaudron ordinaire, fermé par un couvercle de bois dont le centre était percé d'un trou où s'insérait, verticalement, un court tube de bois, lui-même relié à un autre tube de bois formant avec le premier un angle aigu. Ce deuxième tube était attaché à un troisième, en étain — fait avec un plat enroulé sur lui-même — qui traversait obliquement un ballon d'eau froide et où se produisait la condensation... »

L'apparition du navire à vapeur, au XIX^e siècle, mit fin à l'emploi de ce bouilleur rudimentaire, puisqu'il était facile, à l'aide d'un simple réfrigérant, de condenser la vapeur provenant de la chaudière. Ce procédé fut utilisé en 1884 [14] pour ravitailler en eau les troupes britanniques d'Égypte; il est décrit dans les termes suivants : « ... L'eau distillée produite pour les troupes d'Égypte est obtenue à l'aide d'un dispositif spécial; on emploie pour cela divers procédés de condensation, répondant à divers brevets, mais dont le principe est le même dans tous les cas : la vapeur produite par une des chaudières du navire est condensée, filtrée et aérée dans un appareil spécial. »

1. « De l'eau, de l'eau partout, et pas une goutte à boire. » (*The Rime of the Ancient Mariner.*)

2. Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

Ce procédé suppose que les chaudières sont alimentées à l'aide d'eau salée — usage qui a été courant jusqu'à la fin du XIX^e siècle et n'a été abandonné que quand l'emploi de plus hautes pressions de vapeur et celui de chaudières de plus grandes dimensions ont rendu aléatoire l'emploi de l'eau salée [267], du point de vue tant de la sécurité que de la continuité du fonctionnement. La réalisation de condenseurs efficaces pour les machines à haute pression et les turbines réduisit sensiblement la quantité d'eau nécessaire à la production de force motrice ; et ce facteur, joint à la vitesse accrue des navires à vapeur, qui réduisait la durée des traversées, conduisit à emporter de l'eau douce à bord dans des réservoirs au lieu de distiller l'eau de mer. De nos jours, les bâtiments de haute mer, pour la plupart, ont à la fois des appareils de distillation et de grands réservoirs d'eau douce.

Le matériel de distillation employé à bord se présente généralement sous la forme d'installations à traitement fractionné, dans le cas des bâtiments marchant à la vapeur, et de compresseurs pour ceux qui ont des moteurs diesel. Ireland [191] a étudié les avantages respectifs de la distillation et du réservoir d'eau douce, et établi que l'installation d'un appareil de distillation, permettant une économie de tonnage par la suppression des vastes réservoirs d'eau douce, constitue un véritable placement, rapportant un intérêt qui varie selon la longueur du voyage et le genre de bâtiment, et qui va, dans des cas types, de 2 à 78 %.

Le problème de l'approvisionnement en eau s'est posé aux marins non seulement à bord des bâtiments, mais aussi lorsqu'un naufrage les obligeait à abandonner un grand navire et son équipement mécanique pour se confier à des radeaux et à des canots de sauvetage à rames. On avait alors généralement recours à des procédés chimiques pour purifier l'eau de mer, afin que les naufragés aient à accomplir le moins possible d'efforts physiques. Une des premières solutions proposées a été celle de Kay [13], qui en 1885 démontra qu'un mélange de 0,26 g d'acide citrique pur et de 62,20 g de citrate d'argent déminéralisait suffisamment un demi-litre d'eau de mer pour la rendre potable. Il proposa de préparer une solution de ces sels dans des bouteilles qui seraient arrimées sous les traversins des embarcations de sauvetage, à bord des bâtiments. Il démontra aussi qu'un revêtement de caoutchouc sur la bouteille protégerait la solution contre l'action décomposante de la lumière solaire.

Pendant la seconde guerre mondiale, nombreux furent les marins et aviateurs rescapés qui durent attendre longtemps des secours sur de légères embarcations : cela suscita une foule d'expériences du même genre. Chercheurs américains et britanniques [28, 29, 40, 41, 127, 134] étudièrent un grand nombre de possibilités, et c'est ainsi que fut notamment mis au point l'alambic individuel Visscher, distillant l'eau de mer sous le vide. Un récipient contenant de l'eau de mer est placé contre le corps, à même la peau, de

manière à être au besoin protégé de l'air froid par les vêtements ; une pompe à vide fonctionnant à la main amène la vapeur dans un condenseur simple, refroidi par l'eau de la mer. Cet appareil ne fut pas jugé satisfaisant, partiellement à cause du grand effort physique qu'il exige, partiellement en raison de la difficulté de l'entretenir pendant les longues périodes où il ne sert pas.

On essaya aussi un autre dispositif : l'Ambrust Cup, dans lequel l'air que les rescapés exhalaient en respirant passait dans un récipient entouré de feutre humide où son humidité se condensait. Mais il ne fut pas davantage retenu, en raison également des difficultés d'entretien pendant les longues périodes où il ne servait pas. Cet appareil fournit, d'ailleurs, bien qu'il utilise l'humidité produite par la respiration, et non pas l'eau de mer, la démonstration d'un principe dont il sera question plus loin.

Un troisième appareil mécanique fut expérimenté : l'alambic solaire. Il en existe plusieurs types, mais la description que M^{lle} Telkes [285] donne de l'un d'eux explique comment ils fonctionnent tous. L'appareil se compose d'une enveloppe hermétique en matière plastique transparente de forme à peu près sphérique au sommet et conique à la base. Immédiatement sous la partie sphérique se trouve un tampon horizontal de feutre noir qui, lorsque l'appareil est en usage, se sature d'eau de mer. L'appareil est mis à flotter sur la mer, l'extrémité conique vers le bas. Les rayons solaires, en frappant le tampon absorbant de feutre, provoquent l'évaporation de l'eau ; la vapeur ainsi produite se condense sur les parois de la calotte sphérique, et l'eau de condensation tombe goutte à goutte au fond du cône, où elle est recueillie pour servir ultérieurement. D'après M^{lle} Telkes, les expériences auraient été concluantes ; mais Consolazio [127] a procédé à des essais en mer sur des radeaux, et il a constaté que cet appareil est beaucoup trop fragile pour l'usage auquel il est destiné. On peut également lui reprocher de ne fonctionner que par temps clair.

Les forces armées de la Grande-Bretagne et des États-Unis d'Amérique adoptèrent la solution qui consiste à munir les radeaux soit de bidons d'eau douce, soit de sacs en matière plastique où l'on devait écraser des pastilles de zéolite d'argent ; quand on les remplissait d'eau de mer, il se produisait un précipité qui était retenu par un filtre à l'orifice du tube ; en suçant le tube, on obtenait de l'eau douce. A l'origine, il fallait, pour avoir un certain poids d'eau douce, employer un poids presque égal de produits chimiques ; mais on finit par mettre au point une formule qui permettait d'obtenir un poids d'eau distillée près de six fois supérieur à celui des produits employés.

A terre, le problème de l'utilisation de l'eau de mer ou autres eaux salées s'est posé beaucoup plus tard qu'en mer, car les populations dont l'agriculture était la principale occupation évitaient naturellement les régions arides. Robins [256], qui a étudié l'alimentation

en eau des peuples primitifs non agricoles, signale qu'ils ont coutume de creuser des trous à côté de la nappe d'eau, afin d'obtenir une sorte de filtrage par percolation. Certains des exemples qu'il cite semblent indiquer la présence possible de zéolites naturelles dans le sol, au voisinage de l'eau salée. Nous citerons deux passages de son étude [256] : « ... Dans certaines régions de la Nouvelle-Guinée, M. W. L. Puxley signale que, lorsque les indigènes ont besoin d'eau douce, ils creusent un petit trou dans le sable, à quelques mètres seulement de la mer, et l'eau de filtration qu'ils y recueillent est tout à fait douce... » « ... Les indigènes de Vao, aux Nouvelles-Hébrides, se procurent de l'eau dans des puits artificiels, où le niveau de l'eau monte et descend avec la marée. »

Les phénomènes ci-dessus pourraient toutefois s'expliquer de façon satisfaisante par l'existence d'une nappe souterraine d'eau douce située à une faible profondeur et s'écoulant vers la mer.

L'exploitation de gisements minéraux dans des régions arides comme le Chili, le peuplement de régions semi-arides comme la Palestine ou la Californie méridionale, enfin la pollution des cours d'eau ont, à diverses époques, stimulé l'étude de la déminéralisation des eaux salines. Harding [168] décrit un alambic solaire pour la distillation d'eau de puits contenant 14 % de sels, appareil installé au Chili en 1872 pour l'abreuvement des mulets employés dans les mines de nitrate. En 1930, dans une étude sur les problèmes de l'approvisionnement en eau du Chili septentrional, Rudolph [259] déclarait : « ... L'alimentation en eau potable d'un grand nombre de ces établissements (centres d'exploitation des nitrates et centres miniers) est assurée par la distillation d'eau de rivière saumâtre... »

En 1894, Hill [176], constatant la fréquence des cas de typhoïde dans certaines villes des États-Unis, soutint que les filtres en usage avaient des pores trop larges pour faire obstacle si peu que ce fût au passage des bacilles de la typhoïde. Il proposa que l'eau destinée à la consommation humaine fût distillée et distribuée dans des canalisations distinctes. Il ne semble pas qu'on ait jamais fait de telles installations, bien que Crank [130] signale l'essai, en 1900, d'un appareil à distiller l'eau destinée à la station navale de Dry Tortugas, en Floride. En 1906, Lefferman [213] proposa un appareil pour la production d'eau distillée à l'usage des grandes villes. En 1929, on signalait [17] qu'à Stearns (Kentucky) on utilisait depuis 1917 l'eau de condensation provenant de la centrale d'une mine de charbon ; on disposait ainsi de 150 à 170 m³ d'eau distillée par jour ; l'eau qu'on mettait dans la chaudière avait une forte teneur en sels minéraux et était inutilisable telle quelle à des fins domestiques. L'exploitation des pétroles de Curaçao et du golfe Persique provoqua dans ces régions un tel afflux de population qu'il fallut assurer un assez fort approvisionnement en eau. Une installation de distillation fractionnée en trois stades,

d'une capacité de 2.650 m³ par jour environ, fut construite en 1949 pour Koweït [42]. Auparavant, un certain nombre d'installations de distillation en six stades avaient été mises en place à Curaçao, portant la capacité totale des installations de la ville à plus de 1.500 m³ par jour. Ces deux installations sont probablement les plus grandes de toutes celles qui fonctionnent actuellement.

Entre 1930 et 1950, une sécheresse prolongée aggrava, en Californie, le problème de l'eau et incita le gouvernement de l'État et les autorités fédérales à financer des recherches [44, 49, 82, 83, 146, 151, 174, 180, 185, 186]. Des travaux avaient déjà été entrepris aux Pays-Bas en vue de hâter le dessalement des terres inondées par la mer. La France s'intéressait à la question tant à cause des régions semi-arides que l'on trouve sur ses côtes méridionales qu'en raison de la présence d'eaux fortement minéralisées dans le sol des parties désertiques de ses territoires nord-africains. Israël se préoccupait de traiter les eaux saumâtres de la région du Neguev. En Australie, l'accroissement de la population rendait particulièrement urgente l'utilisation, pour l'abreuvement des troupeaux, des nappes souterraines d'eaux salines existant dans les régions de pâturage, au centre du pays. En Afrique du Sud, la présence d'eaux saumâtres posait un grave problème en ce qui concerne le dénoyage des mines.

Vers la même époque, des travaux expérimentaux étaient effectués en de nombreux pays du monde. L'Organisation européenne de coopération économique créa un groupe de travail [55] pour coordonner ces travaux en Europe. La plupart des travaux entrepris aux États-Unis furent financés par un même organisme national, le Saline Water Conversion Program, et le coordonnateur de ce programme, M. D.S. Jenkins, fut chargé de les coordonner avec l'œuvre en cours dans d'autres pays et en particulier avec les efforts de l'O.E.C.E. A la date où la présente étude a été rédigée (janvier 1956), des recherches se poursuivaient dans nombre de pays, soit sous les auspices d'organisations privées, soit à titre officiel. Le programme le plus important est probablement celui qu'applique à l'échelon national un organisme du Département de l'intérieur des États-Unis, connu actuellement sous le nom d'Office of Saline Water. Une décision récente du Congrès a prorogé jusqu'en 1962 l'application de ce programme et porté à 10 millions de dollars des États-Unis le total des sommes qui pourront lui être consacrées pendant les dix années prévues.

Il ressort du rapport annuel concernant le Saline Water Conversion Program [77], publié en janvier 1956, que les recherches financées au titre de ce programme permettent d'espérer que la production d'eau déminéralisée reviendrait à 80 dollars environ les 1.000 m³. Cependant, ce rapport recommande également la construction d'installations pilotes, qui permettraient d'évaluer plus rigoureusement les dépenses d'entretien et de fonctionnement.

COMPOSITION DE L'EAU DE MER

La composition de l'eau de mer a fait l'objet de diverses recherches. Les premiers chercheurs, notamment Kay [13], ont déterminé cette composition d'après les sels qu'on obtient par évaporation complète.

Plus récemment, on a considéré l'eau de mer [79, 261, 281] comme une solution diluée dont la composition pouvait se définir en fonction de ses éléments ionisés. Les résultats de toutes les analyses présentent de nombreux points communs, de sorte qu'on s'est mis d'accord sur la composition « normale » de l'eau de mer, qui est la suivante [79] :

	Grammes par kilogramme	Poids moléculaire par litre	Equivalent en grammes par litre
Cations			
Sodium Na ⁺	10,722	0,4662	0,4662
Magnésium Mg ⁺⁺	1,297	0,0533	0,1067
Calcium Ca ⁺⁺	0,417	0,0104	0,0209
Potassium K ⁺	0,382	0,0098	0,0098
TOTAL des cations	12,818	0,5397	0,6036
Anions			
Chlorure Cl ⁻	19,337	0,5453	0,5453
Sulfate SO ₄ ⁻⁻	2,705	0,0281	0,0564
Bicarbonate HCO ₃ ⁻	0,097	0,0016	0,0016
Carbonate CO ₃ ⁻⁻	0,007	0,0001	0,0002
Bromure Br ⁻	0,066	0,0008	0,0008
TOTAL des anions	22,212	0,5759	0,6043

L'alcalinité de l'eau de mer normale, qui est généralement exprimée par la concentration en ions hydrogène, est de pH = 7,5 — 8,4 [166], avec une densité de 1,0243 à 20°C. En 1950, Hampel [166] a constaté une densité de 1,0197 à 30°C et, à la même température, un pH de 7,37, pour des échantillons prélevés dans l'océan Atlantique. La faible ampleur de cette déviation est caractéristique du haut degré d'uniformité des eaux de l'océan, phénomène généralement attribué à la diffusion rapide des ions.

Combien peut-il rester de chaque ion dans l'eau de mer sans qu'elle soit inutilisable par les végétaux et les animaux? En 1885, Kay [13] a résumé ainsi les effets des diverses combinaisons des ions : « ... C'est au sel ordinaire que l'eau de mer doit d'être dangereuse à boire. Elle provoque la soif, probablement parce qu'elle exerce une action styptique sur les glandes salivaires, et produit le scorbut par son action délétère dans le sang, lorsqu'on en abuse. En outre, le sodium étant anodin quand il est en combinaison avec un acide végétal ou organique comme l'acide citrique ou tartrique, M. Kay en déduit que c'est le chlore qui est l'élément nuisible à éliminer de l'eau de mer... »

Des recherches récentes [20, 127, 205, 236, 249] ont abouti aux mêmes conclusions générales, bien que

le raisonnement soit présenté de façon plus moderne. C'est ainsi que Consolazio [127] soutient que si l'eau de mer n'est pas buvable telle quelle, c'est qu'elle augmente encore la déshydratation : non seulement il faut évacuer une grande quantité d'eau pour éliminer les sels marins, mais en outre les vomissements et la diarrhée qui suivent fréquemment l'absorption massive d'eau de mer entraînent une perte d'eau considérable. Il a constaté aussi, à la suite d'essais, qu'il faut, pour empêcher le déséquilibre des ions dans le corps humain, absorber deux volumes d'eau douce pour un volume d'eau de mer.

Comme l'eau à l'état naturel contient généralement une quantité appréciable de sels, dont certains ont les effets fâcheux signalés ci-dessus pour l'eau de mer, des normes assez rigoureuses ont été établies dans différents pays, pour l'eau que distribuent les autorités municipales. Celles qu'a fixées aux États-Unis le U.S. Public Health Service [261] en sont un exemple : la teneur totale en sels ne doit pas en principe dépasser 500 p.p.m.¹ et doit être, en tout cas, inférieure à 1.000 p.p.m. En outre, la teneur en ions magnésium doit être inférieure à 125 p.p.m., la teneur en ions chlorure à 250 p.p.m., et la teneur en ions sulfate à 250 p.p.m. Le U.S. Naval Medical Research Institute a procédé à cet égard à de nombreux essais d'où il a conclu qu'en ce qui concerne les trousseaux de secours pour radeaux de sauvetage, on pourrait se contenter de normes un peu moins rigoureuses que ces normes de l'U.S.P.H.S. Il a fixé la teneur maximum en sels divers à 1.500 p.p.m., et porté la teneur maximum en chlorure de sodium de 300 à 400; la teneur en ions magnésium doit être, selon lui, aussi faible que possible, et la teneur en ions sulfate ne doit pas dépasser 250 p.p.m. Cette plus grande tolérance a permis de réduire sensiblement le prix de revient des appareils.

En ce qui concerne l'emploi de l'eau pour l'irrigation, il est évident, si l'on y réfléchit, qu'un équilibre est nécessaire entre les sels que l'eau fournit au sol et ceux qui sont absorbés par la végétation, ou qu'il faut lessiver périodiquement le sol à l'aide de fortes quantités d'eau peu salée. Il est évident aussi que la tolérance aux sels d'un sol donné dépendra de la composition physique et chimique de ce sol, de la nature de la végétation et du taux d'évaporation superficielle. Or ces facteurs varient à tel point qu'il est impossible de définir exactement les tolérances. Cependant Rudolph [259] cite des régions agricoles du Chili où l'eau contient plus de 1.000 p.p.m. de solides. La présence de chlorure de sodium dans les eaux d'irrigation semble être nuisible [19], car il encrasse les pores de certains sols et réduit ainsi le taux de percolation. La comparaison de diverses eaux naturelles qui se prêtent mal à l'irrigation conduit à la conclusion que l'eau d'irrigation doit satisfaire à peu près aux mêmes conditions que l'eau potable.

1. p.p.m. = parties par million.

PROCÉDÉS DE DÉMINÉRALISATION

Les caractéristiques de l'eau de mer rendent techniquement possible l'emploi de nombreux procédés de réduction ou d'élimination des éléments ionisés. Les procédés physiques tirent parti des changements d'état de l'eau lorsqu'elle se vaporise ou se solidifie, ou des phénomènes de pression osmotique, d'absorption et de diffusion. Les procédés chimiques reposent non seulement sur la précipitation, mais aussi sur l'hydratation et l'échange d'ions. Les procédés électriques comprennent de nombreuses variantes de l'électrolyse ainsi que l'utilisation des effets électromagnétiques. Tous les phénomènes n'ont pas été exploités ainsi que le montrent les tableaux des rapports annuels du Département de l'intérieur des États-Unis [64, 70, 77, 119].

L'exposé qui suit a pour objet de résumer les travaux auxquels on s'est livré et de signaler les phénomènes dont on n'a pas encore tiré parti.

Avant d'examiner les divers procédés, il convient de se demander si un procédé quelconque peut être suffisamment économique pour justifier des recherches. Aultman [32] a abouti à la conclusion que, pour les procédés connus à l'époque (1949), les besoins d'énergie étaient à eux seuls si grands que l'utilisation de l'eau de mer en Californie était complètement impraticable. Il signalait que des alambics à thermo-compression, qui consomment 25 kWh par mètre cube, auraient absorbé, pour alimenter en eau la seule ville de Los Angeles, le quart du pétrole produit en Californie. La thermodynamique permet d'étudier certains aspects des besoins d'énergie.

On peut évaluer ces besoins d'énergie en appliquant

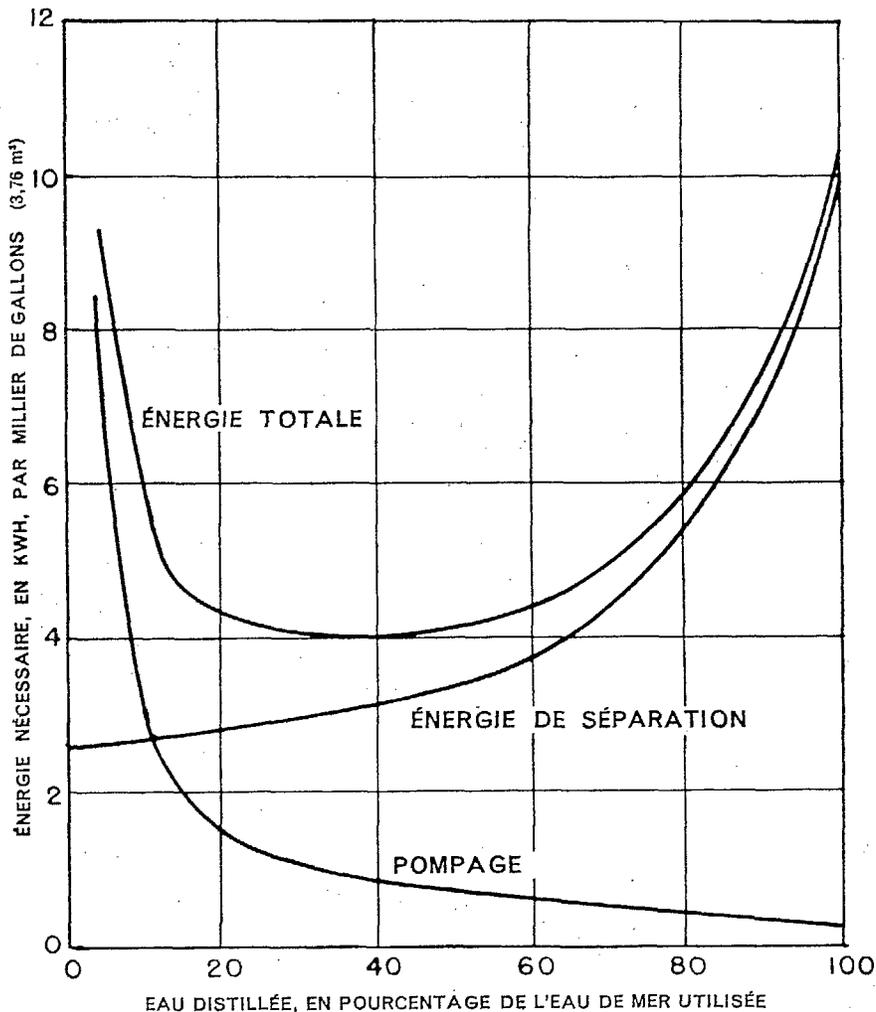


FIGURE 1. Énergie théoriquement nécessaire pour séparer l'eau douce de l'eau de mer. En ce qui concerne le pompage, on suppose une perte de charge de 15 mètres dans les appareils et un rendement de 70 %. (Extrait de *Industrial and engineering chemistry*, vol. 17, décembre 1955, p. 2410, copyright American Chemical Society [153].)

la première et la deuxième loi de la thermodynamique à un système idéal dans lequel on ferait intervenir la chaleur et l'énergie mécanique pour diviser un courant d'eau de mer en deux courants, l'un de saumure, l'autre d'eau déminéralisée. Ces calculs ont été faits par Sherwood [49], Murphy [64], Tribus [291], Gilliland [153], Ellis [141], et d'autres. Il semble qu'on puisse en tirer la conclusion générale que la valeur minimum absolue est de l'ordre de 0,7 à 0,8 kWh par mètre cube. Cette valeur varie proportionnellement à la fraction de l'eau de mer qui est déminéralisée et devient utilisable. Les chiffres minimums cités ci-dessus correspondent à de faibles valeurs de cette fraction.

Gilliland [153] a fait remarquer que l'énergie nécessaire pour pomper l'eau de mer et la faire passer dans les appareils varie en sens inverse. Ayant évalué l'énergie employée au pompage dans des conditions arbitraires de perte de charge et d'efficacité de pompage, il a obtenu les résultats qu'illustre la figure 1. En partant de ces considérations et en adoptant comme probable un coefficient d'approximation de trois ou quatre, il semble raisonnable de conclure à la possibilité de mettre au point un procédé qui exigerait beaucoup moins d'énergie que tous ceux qui existent actuellement, à savoir environ 3 à 4 kWh par mètre cube.

PRIX DE REVIENT DE L'EAU

L'importance accordée au prix de revient de l'eau douce obtenue à partir de l'eau de mer varie suivant qu'il s'agit, par exemple, d'une île déserte où il n'existe aucune autre source d'approvisionnement d'eau, ou d'une région semi-aride comme la Californie méridionale. Dans le premier cas, les frais doivent naturellement être réduits au minimum; mais s'il est indispensable, au contraire, que la région soit occupée, les frais ne seront trop élevés que si l'on ne peut y faire face sans compromettre gravement le succès de l'entreprise à laquelle répondait essentiellement l'établissement initial. Dans le cas d'une région côtière semi-aride, on aura recours à la purification de l'eau de mer pour éviter d'avoir à amener de l'eau des régions de précipi-

tation excédentaire par des systèmes plus ou moins compliqués d'aqueducs et de réservoirs, de sorte que les frais de l'opération doivent pouvoir supporter la comparaison avec les frais d'adduction d'eau naturelle. C'est pourquoi certains procédés ou certaines installations de purification de l'eau de mer qui seraient jugés tout à fait satisfaisants pour l'alimentation d'une île déserte en eau potable ne conviendraient absolument pas pour une région semi-aride. Toutes les études récemment publiées aux États-Unis sur les prix de revient de l'eau obtenue par purification envisagent la question du point de vue de la concurrence avec les eaux importées.

La comparaison du prix de revient des différentes installations étant compliquée par la diversité des méthodes de comptabilité, et par les variations dans l'estimation de la durée utile du matériel et le taux de rémunération de la main-d'œuvre, nous prendrons, comme il a été suggéré précédemment [186], deux bases de comparaison. La mise de fonds initiale pour les installations sera comparée sur la base du taux de production d'eau, exprimé en mètres cubes par jour, tandis que les frais d'entretien et de fonctionnement seront comparés sur la base d'une quantité donnée d'eau et seront exprimés en dollars des États-Unis par mètre cube. Les frais afférents à divers types de travaux d'adduction d'eau douce ont fait dans plusieurs cas l'objet d'études [19, 88, 220, 227, 265, 286] dont les conclusions générales [186] ont été que le prix de revient des installations municipales pour l'utilisation des eaux naturelles varie entre 132 et 1.060 dollars par jour et par mètre cube, et que le montant des frais d'entretien et de fonctionnement se situe entre 0,009 à 0,032 dollar par mètre cube.

Le coût des travaux d'aménagement aux fins d'irrigation est beaucoup plus difficile à évaluer, car la construction des grandes digues nécessaires est souvent financée en partie sur des crédits alloués au titre de la navigation et de la lutte contre les inondations. Aussi le meilleur critère semble-t-il être le prix que les cultivateurs paient pour l'eau. En Californie, par exemple, le tarif actuel va de 1 à 40 dollars par *acre foot* (1.228,16 m³), ce qui correspond à 0,0008 et 0,032 dollar respectivement par mètre cube. Toute augmentation de ces prix doit être justifiée par un accroissement de la production agricole à l'hectare.

DISTILLATION FRACTIONNÉE

C'est la plus ancienne des méthodes couramment employées. Elle est couramment utilisée sur les navires, et c'est aussi la seule qui soit appliquée jusqu'ici dans de grandes installations côtières. Elle est fondée sur la propriété qu'a l'eau de bouillir à une température

sensiblement plus élevée lorsque la pression augmente, de sorte que la condensation de la vapeur à une certaine pression peut fournir la chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau à une pression inférieure. La figure 2 montre le rapport existant, pour l'eau pure, entre la

température d'ébullition et la pression. La présence de sels dissous élève légèrement la température d'ébullition.

L'application pratique de ce principe est indiquée schématiquement à la figure 3. De la vapeur venant d'une chaudière ou d'un autre appareil destiné à évaporer une partie de l'eau de mer est envoyée dans un premier évaporateur afin de fournir la chaleur nécessaire pour l'évaporation d'une nouvelle quantité d'eau

rapport entre le coût et le nombre des stades. En procédant à la différenciation de cette formule et en appliquant le critère mathématique pour les valeurs minimums, il est arrivé à la conclusion que les frais seraient réduits au minimum si l'installation comprenait entre dix et dix-sept stades ; ils seraient alors de l'ordre de 0,12 à 0,07 dollar par mètre cube. Il y a lieu de remarquer, aux fins de comparaison, que les constructeurs américains emploient généralement des appareils

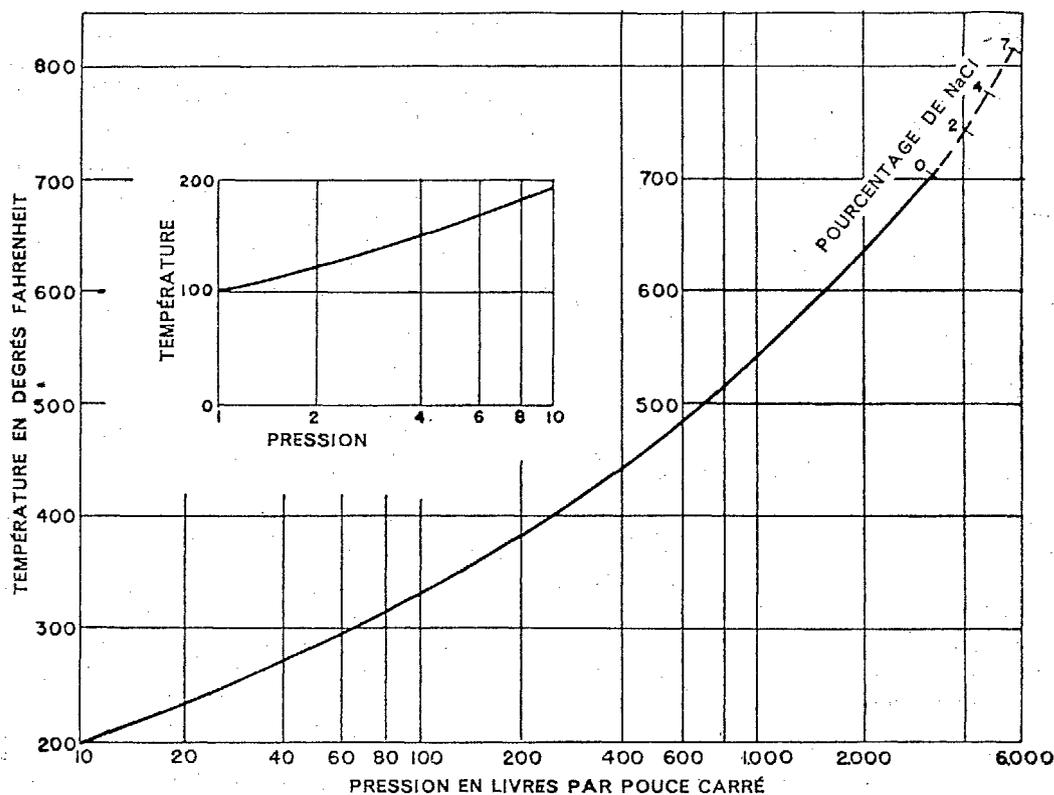


FIGURE 2. Rapport entre la température d'évaporation de l'eau et la pression. Le trait continu représente la courbe pour l'eau pure. Le trait pointillé montre la variation de la pression et de la température critiques selon le degré de concentration du sel dissous.

de mer. Le même processus se répète à chaque stade, et l'eau de condensation obtenue à tous les stades — sauf le premier — est recueillie à la sortie du condenseur. Il importe de remarquer que la quantité de chaleur transmise à l'eau de refroidissement dans le dernier condenseur varie en fonction inverse du nombre de stades. Ainsi, plus l'opération est fractionnée, mieux la chaleur est utilisée. Mais les frais de l'installation augmentent sensiblement avec le nombre de stades, et beaucoup d'installations sont aménagées de manière à réduire au minimum le coût total. Gilliland [153], après avoir étudié ce problème du point de vue mathématique, a établi une équation algébrique exprimant le

à trois stades, tandis que les constructeurs britanniques utilisent six stades. Le prix de revient est de l'ordre de 0,8 dollar par mètre cube.

L'établissement des plans d'appareils pour le traitement fractionné est minutieux [85, 171, 188, 189, 296, 297] ; il pose les problèmes d'échanges de chaleur et d'écoulement fluide qui caractérisent tous les appareils d'évaporation et de condensation. Si l'on veut que l'installation soit autonome, il faut lui adjoindre une source de vapeur — généralement une chaudière à vapeur. Les installations de ce genre comprennent parfois des turbines ou des machines à vapeur qui actionnent les diverses pompes et fournissent l'énergie

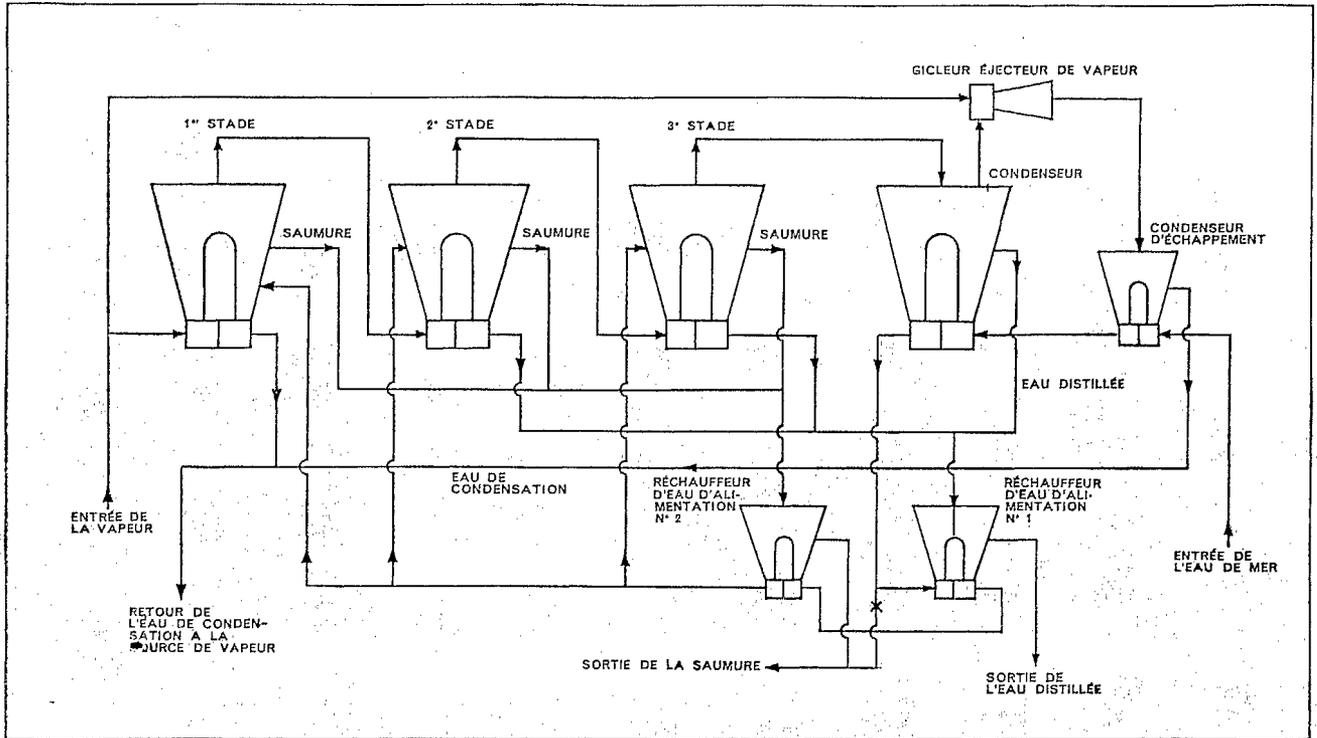


FIGURE 3. Appareil de distillation à trois stades : schéma.

nécessaire à toute l'installation. L'installation côtière diffère donc sensiblement des appareils maritimes, qui n'utilisent en général qu'une faible partie de la vapeur produite par les chaudières principales. Aussi considère-t-on souvent que l'appareil maritime de distillation ne comprend que les divers évaporateurs, plus les dispositifs accessoires nécessaires à leur fonctionnement, soit essentiellement les appareils indiqués à la figure 3.

La consommation d'un appareil à six stades serait d'environ 17 kg de carburant, ayant un pouvoir calorifique de 4.600 kilocalories par mètre cube d'eau distillée (ou bien encore, si on l'exprime par la quantité d'énergie que pourrait fournir la même quantité de carburant, de 110 kWh environ par mètre cube d'eau distillée). Devant l'importance de la consommation de carburant, divers chercheurs ont proposé d'associer à l'installation de distillation une centrale électrique. Impagliazzo [188, 189] a proposé d'utiliser la vapeur à faible pression sortant des purgeurs, de manière à réduire les frais de carburant qui grèvent l'opération de distillation. Howe [185, 186] suggère d'employer les déperditions de chaleur des centrales diesel, de façon à éviter l'emploi direct de carburant, et le Département de l'intérieur des États-Unis [77] a tout récemment signalé qu'on envisage sérieusement une installation combinant la thermocompression avec l'emploi d'appareils à plusieurs stades, de manière que

toute la chaleur perdue dans la machine motrice soit utilisée dans le dispositif de distillation.

Jusqu'ici, nous n'avons étudié que des appareils où la vapeur se forme directement sur la surface chauffante, sous l'action de la chaleur que celle-ci transmet. Un autre système, celui de la distillation fractionnée par évaporation instantanée, est conçu de telle manière que la vapeur, à chaque stade, est produite par l'action de la chaleur provenant du refroidissement de la grande masse d'eau d'alimentation au moment où elle est pulvérisée dans la chambre d'évaporation instantanée. (Ce procédé est analogue à celui, bien connu, de la tour de réfrigération, où une grande masse d'eau chaude est refroidie par l'évaporation d'une faible partie de cette masse d'eau). L'eau de mer injectée dans le circuit passe à travers des tubes en faisceaux placés près de la partie supérieure de chaque chambre de pulvérisation et est chauffée par la condensation de l'eau distillée sur la surface extérieure des tubes. La température initiale de l'eau de mer pénétrant dans le premier élément est d'environ 76°C. Les installations courantes dont les caractéristiques sont connues comprennent de cinq à huit stades et peuvent traiter jusqu'à 190 m³ par jour. Les prix de revient correspondant à ce genre d'installation n'ont pas été publiés, mais ils passent pour bien moins élevés que dans le cas des anciens types d'appareils.

DISTILLATION SOUS PRESSION CRITIQUE ET SUPERCRITIQUE

Benson [38] suggère l'emploi de la chaudière à pressions critiques pour obtenir la déminéralisation ; il rappelle que la chaleur latente de l'eau est nulle au point critique, et très faible à des pressions immédiatement inférieures à ce point critique. Avec une chaleur latente très faible et tendant vers zéro, il estime possible de transférer la chaleur en réduisant les déperditions au minimum. Son système consiste essentiellement à chauffer l'eau de mer dans le fourneau de la chaudière sous des pressions suffisamment élevées pour empêcher l'évaporation et à la faire ensuite passer par un orifice dans la chambre d'évaporation extérieure au fourneau. Là, une partie de l'eau s'évaporerait instantanément à sa sortie de l'orifice, en raison de la chute de pression, et la vapeur ainsi produite serait renvoyée au fourneau pour y être surchauffée avant de passer dans la turbine. L'eau de condensation recueillie à la sortie de la turbine constituerait alors l'eau distillée fournie par l'installation. Les conditions particulières choisies par Benson sont telles qu'environ 50 % de l'eau de mer seraient immédiatement transformés en vapeur. On n'a pas, pour ce système, procédé à l'estimation des prix de revient ; mais ceux-ci correspondraient simplement au supplément de dépenses à prévoir, en plus de ce que coûterait un générateur d'énergie du type ordinaire.

Von Platen [295] a proposé un système reposant sur l'emploi de pressions encore plus élevées. A l'aide des données d'Olander [245], il a montré que, les points

critiques de température et de pression des solutions de chlorure de sodium s'élevant avec le degré de concentration, il serait possible d'utiliser des pressions supercritiques par rapport à la pression critique de l'eau pure. Les données d'Olander indiquent en outre que la vapeur provenant des solutions salines présente une concentration appréciable de sels qui varie avec la pression et la température.

L'appareil de von Platen consistait essentiellement en un échangeur de chaleur par courants contraires, un corps de pompe et un cylindre de décompression pour réduire la pression de la saumure. Des essais effectués avec l'échangeur de chaleur, à Stockholm, ont permis de préciser les problèmes que posent les dépôts de sels et la corrosion qui se produisent à ces pressions et à ces températures élevées.

Les études les plus récentes faites au sujet de ce système sont celles auxquelles les Nuclear Development Associates se sont livrés, dans le cadre du programme du Département de l'intérieur des États-Unis [64, 70, 77]. Le système envisagé est essentiellement celui de von Platen, mais des turbines hydrauliques et des pompes centrifuges remplacent les appareils du type à piston qui figurent dans le brevet de von Platen. Il a été signalé [77] que les dépôts de sels sont importants au-dessus de 171°C et que le succès de ce procédé, du point de vue économique, dépendra essentiellement de la mesure dans laquelle on parviendra à éviter les dépôts salins épais.

DISTILLATION PAR THERMOCOMPRESSION

Ce procédé de distillation a été mis au point par von Kleinschmidt pendant la seconde guerre mondiale, à l'intention de la marine américaine. Par la suite, il a été utilisé pour les troupes cantonnées dans les régions côtières désertiques et pour l'approvisionnement en eau potable du personnel des exploitations pétrolières, comme celles du golfe Persique.

La distillation par thermocompression est une application de la pompe thermique dans laquelle la chaleur nécessaire à l'évaporation provient de la condensation d'eau déjà évaporée. Étant donné que la température de condensation doit être plus élevée que la température d'évaporation pour que le liquide en évaporation reçoive de la chaleur, on augmente la température par compression de la vapeur, d'où le nom de *vapour compression* que l'on donne en anglais

à ce procédé. L'installation nécessaire pour l'application de ce procédé est indiquée schématiquement à la figure 4. La vapeur provenant de l'évaporateur est comprimée et atteint une température supérieure de 5,5°C environ à celle à laquelle elle s'est formée. Cette vapeur à haute température est alors ramenée par une canalisation dans l'évaporateur où elle se condense et abandonne sa chaleur qui sert à produire encore de la vapeur. La figure indique schématiquement que l'eau se condense à l'intérieur des tubes, l'eau de mer en évaporation se trouvant à l'extérieur de ces tubes. La figure montre également les réchauffeurs qui sont nécessaires pour récupérer la chaleur de la saumure chaude et de l'eau condensée chaude. La source auxiliaire de vapeur est indispensable non seulement pour réduire la différence de chaleur latente

aux deux températures, mais aussi pour compenser les déperditions de chaleur dans l'ensemble de l'installation. Il est évident que ce système pourrait fonctionner avec diverses combinaisons de température initiale et de différence de température. Si, par exemple, la

des courbes qui fournissent des critères approximatifs de rendement. Avec des coefficients moyens de transfert de chaleur pour les évaporateurs-condenseurs, ses conclusions concordent assez bien avec celles de Latham [212] et de Campobasso [115], à savoir que les dépenses

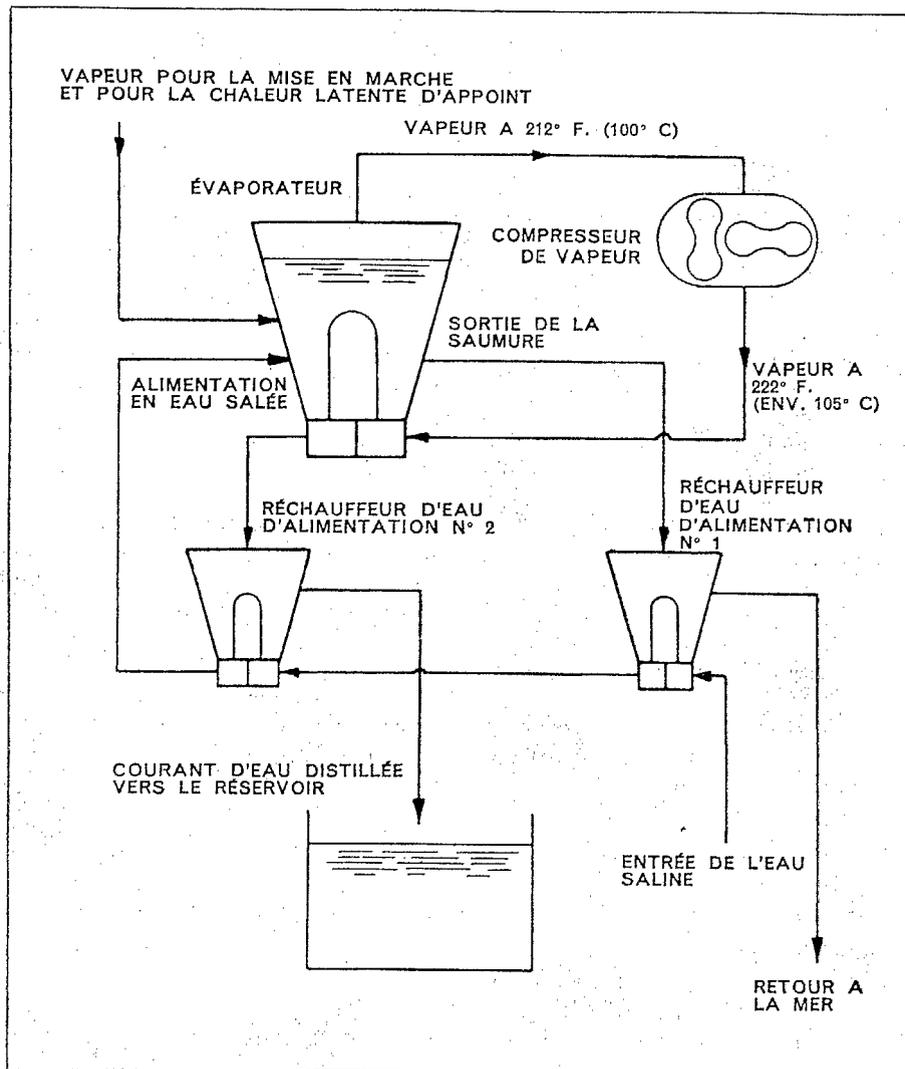


FIGURE 4. Distillation par thermocompression : schéma.

température de l'évaporateur était maintenue à la température de la mer, l'un au moins des réchauffeurs pourrait être supprimé. Mais le fonctionnement d'une installation de ce genre exigerait le maintien d'un vide poussé dans l'ensemble du système, et il faudrait pour cela de grands dispositifs pour la compression de la vapeur et le transfert de la chaleur. Heinz [173] a étudié cet aspect du problème ainsi que beaucoup d'autres éléments variables du système, et il a établi

totales sont réduites au minimum lorsque les différences de température sont de 5,5°C environ.

Avec cet appareil, la consommation de combustible dépend essentiellement de la différence de température à réaliser dans l'évaporateur-condenseur. Pour la différence de 5,5°C indiquée ci-dessus, la limite semble être d'environ 200 kg d'eau douce pour chaque kilogramme de carburant brûlé dans un moteur diesel fournissant l'énergie au compresseur et la chaleur à la

vapeur. Les projets du Département de l'intérieur des États-Unis tendent à réduire cette différence de température à 1,7°C environ [64, 70, 77]. Hickman ainsi que Dodge et Bliss [70] ont signalé qu'ils avaient obtenu un certain succès, le premier en utilisant une surface tournante pour le transfert de la chaleur, les seconds en recourant à la circulation forcée et à la condensation en gouttelettes.

Doté des derniers perfectionnements, l'appareil de Hickman présentera les caractéristiques suivantes [77] : « L'alambic envisagé, pour 25.000 gallons par jour (94 m³), aura approximativement un diamètre de 9 pieds (2,75 m) et une hauteur de 16 pieds (4,90 m), et contiendra dans un seul manchon tubulaire vertical huit doubles rotors évaporateurs d'un diamètre de 8 pieds (2,44 m), mus par des moteurs électriques consommant en principe de 40 à 50 kWh pour une production de 1.000 gallons (3,785 m³) avec une chaleur d'appoint. Chaque jour, 75.000 gallons (283,9 m³) d'eau de mer filtrée seront introduits dans l'appareil, 50.000 gallons (189,270 m³) de saumure rejetés, et 25.000 gallons (94,635 m³) d'eau nouvellement distillée livrés à la consommation. »

Il ressort des tests préliminaires, faits avec un seul rotor, qu'on peut obtenir des taux de transfert de chaleur allant jusqu'à

$$2.500 \frac{\text{B.T.U.}^1}{\text{heures} \times \text{pieds}^2 \times \text{°F}}$$

c'est-à-dire quatre fois plus élevés qu'avec les anciennes installations.

La capacité maximum de l'installation ordinaire est limitée par les dimensions du compresseur. Il faudrait utiliser un type de compresseur qui permette d'élever le taux de compression dans les moments où l'incrustation de sels s'épaissit à la surface de l'échangeur de chaleur du côté de l'eau de mer, si bien qu'une plus grande différence de température est nécessaire pour maintenir le rendement. Les propriétés de la soufflerie du type Roots (pompe à engrenages, avec deux ou trois

dents par engrenage) sont satisfaisantes, mais les dimensions de ce type de compresseur ne peuvent dépasser celles qui correspondent au déplacement volumétrique de vapeur nécessaire pour produire 15 m³ environ d'eau distillée par heure. Si l'on parvenait à éviter l'incrustation de la surface de l'échangeur de chaleur, on pourrait utiliser des souffleries axiales et centrifuges d'une capacité bien supérieure à 15 m³ par heure. L'alambic de Hickman mentionné ci-dessus utilise comme pompe l'effet centrifuge de la surface tournante de transfert de chaleur, grâce à la faible différence de température nécessaire et à l'absence de dépôt.

La formation de dépôt (incrustation) sur la surface de transfert de chaleur a fait l'objet de nombreuses études. Langelier [208] a proposé l'emploi de produits chimiques, d'autres [56, 64, 70, 116] ont envisagé l'emploi de basses températures pour ralentir la formation des dépôts. Bien qu'aucune solution ne se soit encore imposée comme la meilleure, il est maintenant possible d'utiliser des appareils marins de ce type pendant quatre mille heures environ sans les nettoyer au lieu des trois cents heures qui étaient d'usage il y a quelques années.

Le coût de l'eau produite par l'appareil du type commercial actuel a été évalué par Latham [212] et par Campobasso [115]. Latham donne le chiffre de 0,32 dollar des États-Unis par mètre cube (courant à 0,007 le kWh, ou carburant à un prix correspondant), compte tenu de tous les frais, tandis que, selon Campobasso, les investissements nécessaires pour des appareils actionnés par des moteurs diesel ou des moteurs électriques se situent entre 1.840 et 2.070 dollars par mètre cube de production quotidienne. Cette charge élevée d'amortissement, ainsi que des taux de chaleur variant entre 19.800 et 20.200 kilocalories au mètre cube, correspondent assez bien au chiffre de Latham. Si l'appareil de Hickman, perfectionné, permet des réductions considérables qu'on en attend, le coût de l'eau produite par la distillation par thermocompression pourrait tomber à 0,08 dollar le mètre cube.

DISTILLATION INSTANTANÉE SOUS VIDE DANS UNE GÉNÉRATRICE A FAIBLE ÉCART DE TEMPÉRATURE

Cette méthode est directement empruntée à Claude [90, 98, 99, 101, 123, 124, 240, 299] qui a proposé de faire évaporer de l'eau relativement chaude prélevée à la surface de la mer et de la faire passer sous vide, en actionnant une turbine, dans un condenseur refroidi par de l'eau fraîche amenée d'une certaine profondeur (environ 450 m). La chaleur latente nécessaire à l'évaporation de l'eau chaude serait obtenue en refroidissant

de quelques degrés, par exemple de 3 à 5°C, une grande quantité d'eau chaude. Le volume d'eau à pomper dans une installation de ce genre serait donc considérable, de même que la quantité d'énergie nécessaire au pompage; l'élément générateur d'énergie joue ainsi

1. British Thermal Unit, valant approximativement, 0,252 kilocalories.

un rôle capital si l'on veut pouvoir distiller une grande quantité d'eau.

Les premiers essais ont été effectués par Claude quelques années avant et après 1930, en France, en Belgique et à Cuba. Les essais tentés à Cuba ont été concluants [123], en ce sens qu'une petite turbine a fonctionné et produit de l'énergie ; mais il a fallu les interrompre en raison de la perte, à deux reprises, du tube sous-marin, due à l'agitation de la mer en profondeur. C'est aussi sous les auspices de la France

était à l'usage des bateaux à vapeur. Une partie de l'eau de mer chaude sortant du condenseur principal du bateau était acheminée dans un évaporateur-condenseur. L'excédent d'eau partiellement refroidie devait être soit rejeté à la mer (dans le plus grand des appareils envisagés) soit ramené dans le condenseur principal (dans le plus petit), au moyen d'une pompe qui était le principal élément consommateur d'énergie. Dans son rapport, Brillé déclare qu'avec des différences de température de l'ordre de 12,5°C ou davantage, la

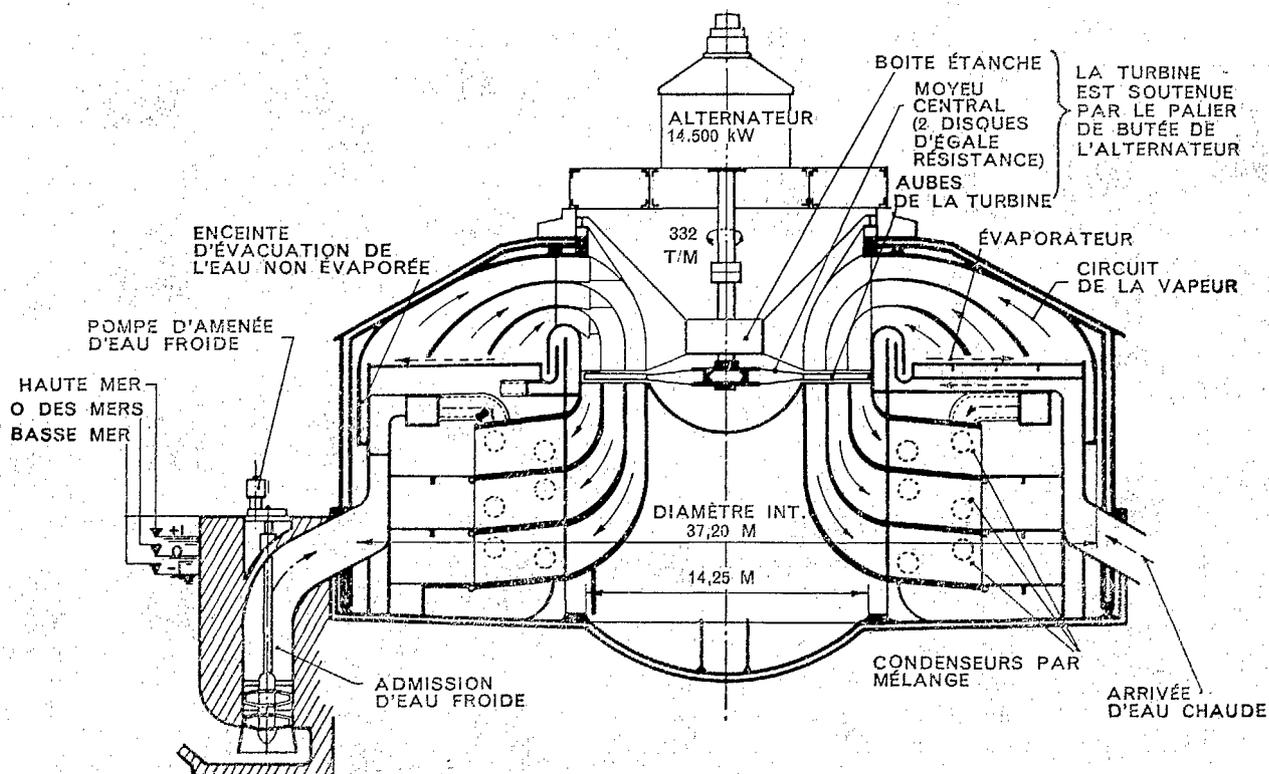


FIGURE 5. Projet de génératrice à faible écart de température pour l'Afrique-Occidentale française.

qu'ont eu lieu récemment des essais qui ont abouti à un projet de création d'une centrale à Abidjan, en Afrique-Occidentale française [90, 240, 241]. Bien que ce projet vise surtout à la production d'énergie (environ 10.000 kW), et qu'il soit question dans les derniers plans de deux groupes de 3.500 kW, il paraît qu'en employant des condenseurs par surface au lieu de condenseurs à jet, on pourrait aussi produire environ 15.000 m³ par jour d'eau distillée. La figure 5, empruntée à l'article français, donne une idée de la disposition et des dimensions du matériel.

Après étude des travaux et des publications de Claude, Brillé [104] a proposé en 1931 d'employer cette méthode d'évaporation pour elle-même en laissant de côté la production d'énergie ; le système qu'il avait en vue

quantité totale d'énergie nécessaire au fonctionnement de cette installation était d'un kilogramme de vapeur pour dix kilogrammes d'eau distillée. Ce rendement est nettement supérieur à celui de l'appareil marin de distillation fractionnée en trois stades ; mais, pour autant qu'on sache, cette méthode n'a jamais été appliquée en grand.

Le projet de Claude n'était réalisable que dans un nombre très limité de régions, situées surtout dans la zone tropicale. Il exige une eau de surface chaude et une profonde gorge sous-marine ayant au moins 20 % de pente à partir de la côte. Pour les autres régions, Brillé [104] a suggéré d'utiliser la chaleur perdue des centrales électriques, Nouguier [243] l'eau chaude provenant des sources thermales naturelles, d'autres

chercheurs la chaleur solaire. (Il faut noter à ce propos que, dans l'installation française d'Abidjan, on prévoit l'utilisation de l'énergie solaire pour élever la température de l'eau chaude.) Ces propositions ont toutes leurs avantages dans tel ou tel cas d'espèce. Comme les centrales électriques et nombre d'usines rejettent de grandes quantités d'eau chaude, elles paraissent constituer la source la plus communément utilisable. La quantité d'eau de refroidissement provenant d'une

Il est utile d'examiner le rapport quantitatif entre l'eau distillée et l'énergie produite. Prenons pour point de départ de cette étude les courbes de la figure 6. Elles se rapportent, par hypothèse, au cas où l'on peut obtenir de l'eau de mer chaude à une température de 32,2°C et de l'eau de refroidissement à 15,6°C; on suppose aussi, arbitrairement, que l'élévation de température dans l'eau de refroidissement du condenseur, plus la différence de température entre l'eau

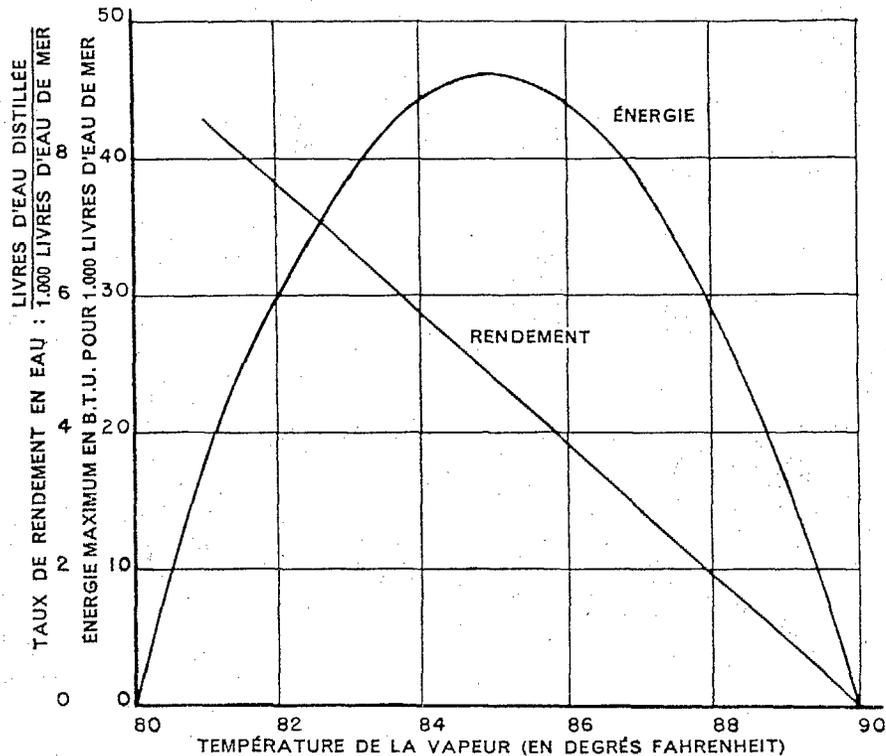


FIGURE 6. Relation entre le rendement, l'énergie théoriquement disponible et la température pour une génératrice à faible écart de température. Eau chaude entrant à 90°F.

centrale thermique varie, évidemment, selon les conditions locales. Mais, dans des centrales modernes à grand rendement, le poids de la vapeur qui entre dans le condenseur est légèrement supérieur à 3 kg par kilowatt-heure. En supposant pour l'eau de refroidissement une élévation de température de 16,5°C, cette eau devrait s'écouler au rythme de 106 litres par kilowatt-heure. Ainsi, une centrale produisant en moyenne 10.000 kWh par journée de travail de vingt-deux heures produirait 22.750 m³ d'eau chaude par jour. En supposant que le rapport de la quantité totale d'eau chaude à la quantité d'eau distillée soit de 200, même une centrale aussi petite que celle-là produirait 113,7 m³ d'eau distillée par jour.

de refroidissement à la sortie et l'eau de condensation, est de 11,1°C. On obtient ainsi une courbe qui représente la production de vapeur en fonction de l'abaissement de température de l'eau chaude, et une autre courbe exprimant l'énergie maximum que peut fournir la vapeur. On pourrait tracer des courbes analogues pour n'importe quelles autres températures. L'établissement des plans se fait par approximations successives. Supposons qu'on désire produire un certain poids d'eau douce : on procède à un premier essai en fixant à un chiffre choisi arbitrairement le rapport entre le poids de l'eau chaude et le poids de la vapeur. On calcule alors la quantité d'énergie nécessaire pour le pompage de l'eau et l'expulsion de l'air, et on la compare avec

la production probable de la turbine. On procède à des essais successifs en prenant d'autres valeurs pour le rapport eau chaude/vapeur, la valeur finalement choisie étant celle qui permet d'établir un équilibre entre la production probable de la turbine et l'énergie nécessaire au pompage, à l'expulsion de l'air et à tous autres usages. Les plans détaillés des différents appareils peuvent alors être établis.

Des essais d'application de cette méthode générale sont en cours à l'Université de Californie depuis 1952.

Deux petites installations ont été construites, la dernière et la plus importante étant capable de produire une dizaine de mètres cubes par jour. Des essais ont eu lieu avec et sans la turbine. Les conclusions générales qu'on en a tirées montrent qu'il serait possible, en se conformant aux indications fournies par ces essais, de construire avec succès de grandes installations de ce genre. Le coût de la vapeur ainsi produite a été évalué à 80 dollars environ les mille mètres cubes, dans des conditions favorables de température.

DISTILLATION SOLAIRE

On pourrait appliquer l'énergie solaire à la distillation, soit en utilisant de la chaleur solaire dans des appareils du type classique, comme ceux des installations de distillation fractionnée, soit en combinant le collecteur de chaleur solaire avec l'appareil de distillation. L'emploi d'un type quelconque de collecteur de chaleur solaire joint à une installation de distillation fractionnée présenterait apparemment l'avantage d'une utilisation efficace de l'énergie thermique. Toutefois, les études qu'ont faites notamment Löff [217], Landry [206], Savornin [262] montrent que le coût initial de collecteurs séparés de chaleur solaire est si élevé que ce système n'a pas un grand intérêt pratique. Löff a étudié également les diverses autres méthodes possibles et il a abouti finalement à la conclusion que le type le plus simple d'installation combinant un collecteur solaire et un appareil de distillation serait aussi le plus économique. Coanda [125, 126] dit avoir construit un appareil de distillation combinant un collecteur parabolique et un appareil de thermocompression; mais on ignore le rendement qu'il a obtenu. Savornin a construit plusieurs variantes du simple alambic, destinées à accroître la circulation de la vapeur d'eau sur la surface où elle se condense, et il a constaté que toutes ces variantes augmentaient le coût initial sans accroître le rendement. Les conclusions auxquelles on a abouti jusqu'à présent sont donc en faveur du simple alambic solaire, malgré l'inconvénient qu'il présente d'exiger l'absorption et la dissipation de toute la chaleur latente de vaporisation pour chaque kilogramme d'eau distillée produit. C'est en soi un inconvénient assez grave si l'on pense qu'une installation à trois stades n'exige que 40 %, et le système de thermocompression que 10 % de la chaleur latente. Les constructeurs de distillateurs solaires se sont efforcés de le pallier par le bon marché des matériaux et la simplicité de la construction.

Le premier alambic solaire d'assez grandes dimensions semble avoir été celui qui fonctionna au Chili [168] entre 1870 et 1880. Dans ses aperçus historiques,

Abbott [1, 3] signale qu'on a essayé d'autres installations, mais il n'en cite aucune qui ait été importante ou durable. Dans quelques-unes, on utilisait des miroirs paraboliques pour concentrer les rayons du soleil; il fallait donc que leur orientation se modifiât suivant le mouvement diurne du soleil et les variations saisonnières de l'angle du zénith. Il en résultait des difficultés presque insurmontables pour les grandes installations de ce type; aussi la plupart des expérimentateurs s'en tinrent-ils à des appareils fixes à orientation constante.

L'utilisation pratique de l'énergie solaire a commencé à l'époque contemporaine avec des installations de chauffage d'eau pour les besoins domestiques. Certaines publications de Boutaric [100], de Brooks [105, 106], de Jaeger [193] et de Merle [223] relatent les travaux effectués dans ce domaine vers 1930-1940. Les chauffe-eau solaires étaient en général des boîtes à couvercles de verre contenant des serpentins de tuyau noirci et placés sur les toits exposés au sud des habitations; le rendement thermique en était assez bon, et on en installa un certain nombre, notamment dans les vallées de l'intérieur de la Californie, où l'ensoleillement quotidien est prolongé.

Cette idée revint à l'honneur au début de la seconde guerre mondiale, lorsque M^{lle} Telkes [285] entreprit de mettre au point un alambic solaire à utiliser sur les radeaux de sauvetage. Après avoir réalisé cet appareil, elle proposa de construire un nouveau modèle de l'appareil chilien en vue d'essais dans les îles Vierges [181]. Les résultats de ces essais ont été résumés par Löff [218] en 1955. Des appareils analogues ont été essayés par Gomella [157] en Algérie, par Martin au Maroc, par Wilson [304] en Australie, par Nobbia [232, 233, 234] en Italie, par Fitzmaurice à Chypre, par Bjorksten [210] et par Howe [187] aux États-Unis. M^{lle} Telkes [284] a continué ses expériences sur l'alambic solaire, et elle a signalé des résultats intéressants qu'elle a obtenus à Cohasset (Massachusetts), avec un modèle de 18,5 m² de surface absorbante. En 1952, elle a participé comme consultante aux essais tentés en Californie [186], et

elle a aidé à établir les plans d'une installation ayant une surface absorbante totale de plus de 93 m², qui fonctionne sans arrêt depuis septembre 1952.

La mise au point des procédés de distillation solaire a été vivement stimulée par trois colloques récents sur l'énergie solaire. Le premier a eu lieu à Madison, dans le Wisconsin (É.-U.A.) en 1953, le deuxième à New Delhi (Inde) en 1954¹ et le troisième à Tucson et Phoenix, en Arizona (É.-U.A.) en 1955. A chacun de ces colloques, la question de la distillation a été examinée en détail. On s'accorde aujourd'hui à reconnaître que l'énergie solaire incidente peut être utilement employée dans la proportion de 30 à 50 %, au moyen d'alambics de type simple à isolation.

L'alambic du type à isolation comprend un plateau de bois peu profond, recouvert d'une hotte en forme de V renversé, faite de plaques de verre fixées dans des châssis parfaitement ajustés ou d'une feuille de matière plastique transparente tendue sur un bâti. Le plateau est rectangulaire, l'axe principal en est orienté dans le sens est-ouest, et il est monté sur des supports qui le tiennent à 30 ou 60 cm du niveau du sol. Les pertes de chaleur à travers le fond du plateau sont réduites au moyen de feuilles de matière isolante. Les divers expérimentateurs ont utilisé des plateaux, de dimensions variables, faits de différents matériaux; ils ont également fait varier l'inclinaison des parois de verre, et d'autres caractéristiques. Les photos ci-jointes montrent des installations typiques. Jusqu'à présent, c'est le verre qui semble convenir le mieux à la construction des hottes transparentes, car on n'a encore trouvé aucune matière plastique absolument satisfaisante. Gomella [157] a proposé l'emploi de plateaux en fibrociment, car cette matière résiste à la fois à la chaleur sèche du Sahara et aux termites, deux dangers qui, combinés, rendent presque impossible la conservation des plateaux de bois.

Löf a proposé une modification de l'alambic à isolation, et le Département de l'intérieur des États-Unis a annoncé en 1955, à la conférence de Tucson, que son programme prévoit la construction de ce modèle révisé. Les plateaux seront faits de béton coulé dans le sol même, qu'ils recouvriront entièrement. Aucune matière isolante n'est nécessaire, car en raison de la grande surface recouverte — 40 ares environ — toutes les pertes de chaleur par le fond sont éliminées, sauf en bordure. La deuxième innovation concerne la hauteur d'eau dans les plateaux, qui atteint près de 30 cm, au lieu d'un centimètre ou même moins dans les alambics du type à isolation. En conséquence, la température de l'eau est plus basse, et la production de vapeur est relativement faible dans la journée; la distillation se produit la nuit, sous l'influence du rayonnement céleste nocturne — de même que dans le procédé employé en U.R.S.S. et précédemment signalé par Fedoseyev [145].

L'attention s'est portée récemment sur plusieurs types d'alambics tubulaires. L'un d'eux a la forme

d'un cylindre de verre dans le plan diamétral duquel se trouve un plateau à eau de mer qui capte la chaleur. La vapeur se forme au-dessus de la surface de l'eau du plateau et se condense sur les parois du tube de verre. La moitié inférieure du tube de verre sert non seulement de collecteur pour l'eau distillée, mais aussi d'écran pour arrêter les radiations, de façon à réduire les pertes de chaleur par le fond du plateau. Howe [187] a signalé des essais effectués avec un petit tube de verre, ainsi qu'avec un alambic de type tubulaire d'environ 15 m de long, formé de feuilles de matière plastique et dont la section a la forme d'un losange. Les essais effectués avec ce dernier appareil ont montré que son rendement était aussi élevé que celui d'un alambic du type à isolation de dimensions analogues.

M^{lle} Telkes [70] a proposé une variante de l'alambic tubulaire, qui a été utilisée par Savornin [262] ainsi que par Lappala et Bjornsten [210]. Le plateau à eau de mer mentionné au paragraphe précédent est remplacé ici par une mèche inclinée, et le tube par une caisse plate dont le dessus et le fond sont en verre ou en matière plastique. La mèche faite de tissu noir est disposée sur le plan médian de la caisse et sert à la fois à capter la chaleur et à alimenter l'appareil en eau de mer. L'eau de mer s'introduit dans l'appareil par la partie supérieure de la mèche, et la saumure s'évacue par la partie inférieure. Les essais actuels ont un caractère expérimental et visent à permettre l'étude des problèmes de construction et d'entretien. Les avantages de cet appareil sont apparemment que la mèche n'emmagasine qu'une très faible quantité d'eau et qu'on peut orienter le plan d'absorption de manière qu'il soit perpendiculaire aux rayons du soleil à midi.

Les données fondamentales sur lesquelles repose la conception de cet appareil sont notamment les suivantes :

1. La durée et l'intensité de l'irradiation solaire [1, 100, 133, 147, 148, 167];
2. Le taux de transmission des radiations par les vitres [24, 25, 106, 144];
3. Le taux d'absorption de l'énergie produite par les radiations [10, 25, 184, 284].

Une fois en possession de ces données, on peut établir les plans d'installations de distillation par la chaleur solaire en tenant compte de tous les aspects de l'énergie. M^{lle} Telkes [80] se sert d'une formule d'équilibre thermique stable, d'après laquelle la quantité de chaleur que reçoivent les parois extérieures de l'appareil à distiller est égale à la valeur totale de cinq déperditions différentes de chaleur d'une part, et de la chaleur absorbée par l'eau d'autre part. Ces cinq déperditions sont dues à la réflexion sur les deux faces du verre, à l'absorption imparfaite par le récipient d'eau, au renvoi de radiations par l'eau chaude au verre, à l'effet de la

1. Voir : *Énergie solaire et éolienne; Actes du colloque de New Delhi*, Unesco, Paris, 1956.

circulation d'air, enfin, aux pertes qui se produisent par le fond du plateau collecteur isolé. Pour un taux d'insolation stable de 812 kilocalories par mètre carré et par heure, M^{lle} Telkes évalue à 68 % l'efficacité d'absorption de l'appareil. A supposer que les régions tropicales arides reçoivent un rayonnement solaire produisant de 5.420 à 6.770 kilocalories par mètre carré et par jour, elle évalue la production quotidienne de cet appareil à un litre d'eau pour 0,12 m² de surface absorbante. Des essais ont montré que, pour produire

un litre d'eau en plein été, il faut en Australie [304] 0,143 m², et en Algérie [157], 0,147 m². La moyenne semestrielle était en Algérie de 0,290 m² et en Californie [187] de 0,370 m² pour un litre d'eau.

Le coût de l'eau produite par la distillation solaire a été évalué par plusieurs chercheurs. Le chiffre le plus bas est celui de M^{lle} Telkes [77]; elle estime que l'on pourrait, en utilisant un appareil tubulaire du type à mèche, atteindre finalement un minimum d'environ 0,21 dollar le mètre cube.

CONGÉLATION

La distillation par le froid, ou séparation de l'eau et de ses éléments minéraux par congélation et fusion, présente un certain intérêt du point de vue de la consommation d'énergie, puisque la chaleur latente de fusion ne représente que le septième environ de la chaleur nécessaire à l'évaporation. Mais il y a plusieurs facteurs dont il faut tenir compte. Premièrement, l'intérêt que présente l'économie d'énergie est fortement réduit par la nécessité d'utiliser de l'énergie mécanique, attendu qu'il n'y a pas de « combustible » dont la « combustion » absorberait de l'énergie à basse température. En second lieu, il n'y a pas séparation automatique entre une « saumure » et l'eau pure, comme dans le cas de l'évaporation. Enfin, il reste à mettre au point une méthode de congélation et de fusion par opérations successives, qui égale le rendement cumulé du procédé de distillation fractionnée par vaporisation.

Il convient tout d'abord d'examiner les données de base qu'on possède sur la congélation d'une eau contenant des sels dissous. Pour les solutions qui ne renferment que du chlorure de sodium, le mélange eutectique contient 23,1 % de sel et se congèle à - 21,1°. Le point de congélation s'élève à mesure que décroît la concentration en sel; il passe par les chiffres de - 1,89° à 3,5 % (concentration approximative de l'eau de mer), pour aboutir à 0° pour l'eau pure. Les variations du point de fusion de l'eau pure suivant la pression sont si faibles qu'elles sont négligeables. Hampel [166] et Rose et Hoover [257] ont mesuré les propriétés de l'eau de mer, qui sont liées à la congélation, et ont constaté qu'elles sont du même ordre de grandeur que pour des solutions de chlorure de sodium.

Aux températures supérieures à - 21,1°, toute masse d'eau de mer congelée se compose de minuscules cristaux de glace pure, et d'une saumure qui renferme les différents sels dissous. Si la masse congelée se présente sous une forme solide, la saumure occupe les minuscules poches qui séparent les groupes de cristaux

de glace; si, au contraire, elle se présente sous forme molle (*slush*), la saumure est maintenue à la surface des cristaux par la tension superficielle. Les expériences que Rose et Hoover [257] ont faites avec de la glace partiellement congelée ont montré que de 20 % à 40 % du poids de saumure sont retenus dans le *slush*, et qu'aucune modification ordinaire de l'agitation, du taux de déperdition de chaleur ou de la concentration n'aurait grande influence sur les dimensions des cristaux. La quantité de sel que renferme la saumure dépend de la salinité de la solution primitive. Si le *slush* est égoutté et si la glace est mise en contact avec une saumure plus diluée, la salinité de la saumure que renferme le *slush* est réduite. En égouttant la glace et en la mettant en contact avec des saumures de plus en plus diluées, on peut arriver à la purifier. Rose et Hoover ont imaginé une expérience de laboratoire dans laquelle ce principe a été appliqué à la mise en contact, à contre-courant, de onze portions distinctes de *slush* avec de la saumure égouttée provenant d'eau de mer. La concentration de la saumure soutirée, après quinze séries de mises en contact, a atteint 19 %, tandis que l'eau de fusion de l'échantillon de glace le plus pur ne contenait que 22 parties de sel par million. Cet intéressant procédé n'a encore fait l'objet d'aucun essai d'application en grand.

Thompson et Nelson [238] ont fait des expériences sur la congélation de cylindres verticaux de glace, en procédant de telle sorte que la congélation se produise du haut vers le bas. Ils ont fait observer que la salinité de l'eau a pour effet d'abaisser non seulement le point de congélation, mais encore la température de la densité maximum. Ces abaissements se produisent à des vitesses différentes, de sorte que le point de congélation et la température de la densité maximum se trouvent être, l'un et l'autre, de - 1,33° pour 2,47 % de NaCl. Ces expérimentateurs ont émis l'hypothèse que la saumure résultant de la formation locale de glace serait donc très dense et descendrait au fond du compartiment de congélation. Cette hypothèse a été vérifiée

par le découpage en tranches et par la fusion des cylindres de glace.

Whitman [303] a étudié la migration des poches de saumure le long d'un cylindre vertical solide fermé de glace d'eau de mer. Selon lui, étant donné que la solubilité varie avec la température, une élévation progressive des températures le long du cylindre ferait migrer les poches de saumure vers l'extrémité la plus chaude du cylindre. Pour vérifier cette hypothèse, il plaça un cylindre vertical de glace dans de l'eau de mer à la température de $-17,8^{\circ}$, tandis que l'extrémité supérieure du cylindre se trouvait dans l'air à des températures immédiatement inférieures à 0° . Au bout de cinq heures et demie d'exposition à ces températures, le cylindre de glace fut découpé en cinq tronçons par des sections horizontales; chaque tronçon fut fondu et analysé. On constata alors que la partie inférieure avait 2,92 % de NaCl, tandis que la partie supérieure en contenait 3,88 %. Un deuxième cylindre fut placé dans de l'eau à $-3,9^{\circ}$, la partie supérieure étant exposée à de l'air à -25° . Au bout de six heures d'exposition, l'analyse des cinq sections montra que la partie supérieure n'avait que 1,86 % de NaCl. D'autres expériences effectuées avec des cylindres d'une température inférieure à la température eutectique n'ont fait apparaître aucune modification de la salinité. Whitman a soutenu que ces expériences montraient comment les icebergs formés dans l'eau salée se purifient progressivement sous l'effet des variations de la température atmosphérique. L'application de ce procédé pour purifier l'eau de mer n'a été proposée que récemment par Goering [77], travaillant pour le Ministère de l'intérieur des États-Unis. Cet auteur appelle ce procédé « congélation par zones » (*zone-freezing*) et le compare au procédé de raffinage par zones que l'on emploie actuellement pour purifier les métaux à point de fusion élevé. Il ressort des comptes rendus préliminaires de ces expériences qu'un seul passage d'une zone à $-22,8^{\circ}$, à une vitesse d'environ 6,35 cm à l'heure, le long d'un cylindre de glace contenant 3 % de NaCl, se traduit par l'élimination de près de 70 % du sel.

Plusieurs expérimentateurs ont fait porter leurs efforts sur la séparation des cristaux de glace et de la saumure par centrifugation. Steinbach [275] expose les résultats d'expériences qui ont consisté à congeler de la glace dans des cylindres creux, que l'on a fait ensuite tourner autour de leur axe principal; la concentration en sel a ainsi été réduite à environ 7 % de sa valeur initiale. Vacino [293] a obtenu de petits groupes de cristaux de glace en mettant de l'eau de mer en contact avec la paroi extérieure d'un tube dans lequel circulait de la saumure réfrigérée. Un anneau, auquel était imprimé un mouvement de va-et-vient, râclait l'extérieur du tube pour en détacher les cristaux. Le

slush résiduel était recueilli dans un cylindre vertical, égoutté et séché par centrifugation. Il était ensuite placé dans un manchon vertical isolant, où on le laissait fondre. Le degré de salinité de l'eau recueillie variait à mesure que la fusion progressait; on mesurait donc constamment la salinité, et le liquide effluent était renvoyé dans la cuve de congélation lorsque la salinité s'élevait au-dessus de 800 p.p.m. Ce procédé a permis de transformer en eau potable 20 % environ de l'eau de mer. Curran [131] a construit une petite machine combinant la cuve de congélation et la centrifugeuse. En appliquant les résultats de ses expériences à l'échelle de grandes installations, il a calculé que les besoins en énergie seraient de 27,8 kWh par mètre cube.

Une troisième méthode de séparation de la glace et de la saumure consiste à appliquer la pression. Moulton et Hendrickson [77] signalent que des pressions de 0,47 à 0,85 atmosphères réduisent la salinité à 500 p.p.m., ce qui permet de récupérer 90 % de la glace qui se trouvait primitivement dans le *slush*. Des expériences se poursuivent en vue de mettre au point une machine à compression adaptable à un cycle continu d'opérations.

On a rarement essayé jusqu'ici d'appliquer l'effet réfrigérant au processus de congélation en vue de récupérer de l'eau. Zarchin [264, 307] a proposé d'appliquer ce principe en comprimant la vapeur d'eau de la cuve de congélation et en envoyant cette vapeur à la cuve de fusion. Ellis [141] a proposé un système de réfrigération dans lequel l'évaporateur se trouverait dans la cuve de congélation et le condenseur dans la cuve de fusion. Jusqu'ici, la plupart des expériences ont porté sur le problème de la séparation de la saumure et de la glace, et l'on a laissé de côté cette question de l'utilisation de la chaleur de récupération.

Moulton et Hendrickson [77] ont fait une série d'essais de machines commerciales à fabriquer de la glace, notamment de machines à fabriquer de la glace en bacs (*can-ice*), de la glace en flocons (*flake-ice*), de la glace en *slush* (*slush-ice*), de la glace en tube (*tube-ice*), et de la crème glacée (*ice cream*). A partir de l'eau de mer, c'est avec des machines à faire de la glace en tube et de la glace en flocons que l'on a obtenu les meilleurs résultats. Il a été établi que le rendement de ces machines est beaucoup moins bon lorsqu'on les alimente avec de l'eau de mer, au lieu d'eau douce,

L'intérêt de la congélation comme procédé de séparation — faible chaleur latente de fusion et faible volume spécifique de la glace par rapport à la vapeur — semble justifier des recherches beaucoup plus poussées. L'évaluation des frais d'installation et de fonctionnement demeure très incertaine; mais il est probable que le prix de revient serait à peu près le même que si l'on a recours à la compression de la vapeur, qui est actuellement le plus efficace des procédés commerciaux de déminéralisation de l'eau.

PROCÉDÉS CHIMIQUES

La déminéralisation de l'eau de mer par des moyens chimiques peut être réalisée, soit par un procédé comportant l'échange d'ions, où l'agent de précipitation peut être régénéré, soit par l'action d'un produit non récupérable qui sera lui-même précipité et éliminé en même temps que les éléments dont on veut se débarrasser. Pour la production d'eau douce en grandes quantités, les considérations de prix de revient obligent à employer des agents de précipitation qui puissent être régénérés, tandis que, pour de petites quantités, cette possibilité de régénération n'a pas grande importance.

Les principaux ions à éliminer sont les ions sodium, magnésium et chlore. Les réactifs du type non récupérable pourraient être des combinaisons comme celle qu'a employée Kay [13], à savoir le citrate d'argent additionné d'une faible quantité d'acide citrique, ou une combinaison de zéolite d'argent, d'hydrate de baryum et d'oxyde d'argent, comme celle que contenaient les trousseaux de secours de la seconde guerre mondiale [190, 290]. Dans les deux cas, le précipité contiendra une forte dose d'ions nocifs et laissera une eau utilisable en cas de besoin. Mais le prix de l'argent qui entre dans ces combinaisons est tel qu'il en interdit l'utilisation en grandes quantités.

Les corps provoquant l'échange, généralement appelés zéolites, connaissent actuellement une grande faveur pour le traitement de tous les types d'eau. Certains existent en gisements naturels, d'autres sont synthétiques. Les matières employées à l'origine étaient des sels doubles naturels (le silicate de sodium et d'aluminium, par exemple). Lorsqu'on fait passer de l'eau contenant une assez forte concentration d'ions magnésium ou calcium à travers une couche d'éléments granuleux enrobés de ce produit chimique, les ions sodium se dissolvent, et les ions magnésium et calcium sont précipités dans le revêtement de produit chimique. Lorsque cette couche, presque saturée d'ions calcium et magnésium, commence à perdre son pouvoir d'absorption, on interrompt le courant d'eau et l'on fait passer une solution de chlorure de sodium à travers la couche granuleuse. Il se produit alors un échange inverse d'ions (régénération) : les ions calcium et magnésium sont remplacés par les ions sodium dans la couche de produit chimique, et évacués avec la saumure résiduaire. C'est un procédé de ce type qu'on emploie d'ordinaire pour le traitement de l'eau douce en vue de son emploi dans les chaudières. Cette application particulière est courante, car le prix du régénérant (chlorure de sodium) est peu élevé, et le rendement très élevé.

L'application à l'eau de mer du procédé d'échange d'ions se fait en plusieurs étapes, en raison de la forte concentration en ions sodium et chlore. Un des procédés qu'on a proposés [79, 289] commencerait par le remplacement des ions sodium par des ions hydrogène, effectué

à l'aide d'un échangeur de cations hydrogène du type charbon sulfoné ou résine sulfonée [242]. Les échangeurs de cations hydrogène échangent des ions hydrogène contre des ions métalliques positifs (sodium, magnésium, calcium, par exemple). Ils n'exercent aucune action sur les ions sulfate ou chlore, mais les ions bicarbonate se décomposent en eau et anhydride carbonique. L'effluent acidifié passe ensuite à travers un échangeur d'anions [289], où une résine-amine complexe de caractère faiblement basique élimine les acides sulfurique et chlorhydrique, mais n'a guère d'action sur l'anhydride carbonique. Enfin, l'eau passe par un dégazeur, qui élimine le CO_2 par aération. Le principe général du dégazeur est semblable à celui d'une tour de réfrigération. La tour est garnie de lamelles qui pulvérisent le courant d'eau et les gouttes sont entraînées par gravité vers la base de la tour. L'air circule vers le haut de la tour et emporte le CO_2 qui s'est dégagé des gouttes d'eau. L'échangeur de cations hydrogène est régénéré à l'aide d'acide sulfurique. L'échangeur d'anions est régénéré à l'aide de carbonate de sodium; puis un rinçage enlève le chlorure de sodium et le sulfate de sodium qui se forment pendant la régénération.

Les frais principaux qu'entraîne l'usage des procédés de ce genre tiennent au prix des produits chimiques employés pour la régénération. On a procédé à une estimation de ces frais pour différentes eaux saumâtres [5, 109, 111, 112, 113, 114, 154, 242], et l'on pense qu'il faut compter en moyenne 0,16 dollar environ au mètre cube pour l'élimination de 1.000 p.p.m. de produits chimiques. Ainsi donc, si l'on voulait déminéraliser de l'eau de mer, l'élimination du seul chlorure de sodium (27.200 p.p.m.) pourrait exiger des régénérants revenant à plus de 4,2 dollars par mètre cube d'eau douce. D'après des chiffres plus récents, cette dépense serait moins élevée : environ 1,60 dollar de produits chimiques par mètre cube [153].

Devant le prix élevé des produits chimiques de régénération, on a cherché à employer l'énergie électrique ou thermique pour obtenir la régénération des corps provoquant l'échange. Spiegler et Coryell [270] ont mis au point un procédé électrique de régénération des corps provoquant l'échange des cations; mais l'examen de ce procédé et des travaux d'autres chercheurs conduit Ellis [141] à conclure que la quantité d'énergie électrique nécessaire serait du même ordre de grandeur que celle qu'exigerait une simple purification électrolytique de l'eau de mer traitée.

Récemment, Gilliland [153] a proposé un système qui permettrait d'employer uniquement la chaleur pour obtenir la régénération. Sous sa forme la plus simple, sa méthode implique l'emploi de l'ion ammonium (NH_4^+) comme ion détachable de l'échangeur de cations, et de l'ion carbonate (CO_3^{--}) comme ion

détachable de l'échangeur d'anions. L'eau déminéralisée contient ainsi en solution du carbonate d'ammoniac. Ce corps peut être éliminé par chauffage; il apparaît alors sous forme de gaz ammoniac (NH_3) et de gaz carbonique (CO_2). La capture de ces gaz permet de les redissoudre dans la solution régénérante et de les faire déposer à nouveau sur les corps provoquant l'échange. Bien qu'aucun résultat d'expériences ou d'essais ne soit présenté, Gilliland évalue le coût de ce procédé à 0,40 dollar par mètre cube.

Divers chercheurs ont proposé de construire des installations pour extraire certains composés chimiques de l'eau de mer et obtenir de l'eau douce comme sous-produit. Mais le principal composé chimique que contient l'eau de mer, le chlorure de sodium, représenterait environ 27 kg par mètre cube. Chaque fois qu'on répandrait sur un hectare de terres une couche d'eau dessalée épaisse de 10 cm, on aurait 27 tonnes de sel; et pour les quantités d'eau que l'irrigation utilise en une année, on aurait une production de sel infiniment supérieure aux besoins. Il semble en aller de même, quoique dans une moindre mesure, pour la plupart des autres composés chimiques que renferme l'eau de mer.

Si l'on emploie un jour des procédés chimiques de déminéralisation des eaux salines, il s'agira probablement d'application d'un procédé comportant l'échange d'ions, et employant l'énergie thermique ou électrique pour la régénération. On ignore actuellement quel pourrait être le prix de revient de l'eau fournie par de telles installations.

EXTRACTION AU MOYEN DE SOLVANTS

L'extraction au moyen de solvants a été proposée comme méthode possible de déminéralisation de l'eau. En exécution d'un contrat passé avec le Ministère de l'intérieur des États-Unis, Harwell, Futrell et Hood [77] se sont livrés à une étude préliminaire de la question. Weldy, travaillant pour l'Université de Californie, a conclu

après étude du cas particulier où le solvant servant à l'extraction est l'acétone, que les besoins en chaleur seraient excessifs.

L'extraction au moyen d'un solvant consiste à mettre de l'eau saline en contact avec un liquide qui absorbera sélectivement soit le sel, soit l'eau. A la sortie de l'appareil, le solvant est débarrassé par chauffage de l'eau ou du sel qu'il contient en dissolution; on le fait ensuite circuler à nouveau à travers l'eau qu'on veut purifier. L'acétone, par exemple, absorbe beaucoup plus facilement l'eau que le sel. On fait fonctionner à contre-courant une colonne d'extraction verticale, l'eau de mer coulant de haut en bas, tandis que l'acétone est propulsée de bas en haut. La saumure qui sort en bas de la colonne est enrichie, alors que l'acétone qui sort par le haut est chargée d'eau. On la recueille dans une cuve de séparation par phases ou on la chauffe pour faire évaporer par ébullition l'acétone, plus volatile. On soutire de la cuve de l'eau pure, à l'état liquide; quant à la vapeur d'acétone, elle est condensée en vue de son emploi. Des échangeurs de chaleur servent à réduire au minimum les besoins nets de chaleur. Il paraît évident que le même effet ne pourrait être obtenu au moyen d'un solvant qui absorberait les sels plutôt que l'eau.

Harwell et ses collaborateurs n'ont pas employé l'acétone, en raison des grandes quantités de chaleur qu'elle exige. Ils ont fait porter leurs efforts sur l'étude de nombreux autres composés organiques présentant à l'égard de l'eau un plus grand pouvoir d'absorption. Ils ont envisagé notamment l'emploi de plusieurs amines qui, dans la phase solvante, absorberaient jusqu'à près de 25 % d'eau et 0,14 % seulement du sel de l'eau de mer. Quelque 150 composés ont été étudiés, notamment les amines, et les éthers de glycol. On a essayé de procéder par étapes, de façon à réduire au minimum les pertes du solvant et de rendre l'eau plus pure. D'après le rapport le plus récent sur cette question [77], on a bon espoir de parvenir à réaliser techniquement une installation pilote utilisant ce procédé; mais il faudra attendre l'achèvement des études relatives à cette installation pilote pour avoir une idée des prix de revient.

MÉTHODES ÉLECTRIQUES

L'eau de mer étant elle-même un électrolyte, il est normal qu'on songe à la déminéraliser par électrolyse, procédé qui a été utilisé pour purifier l'eau à l'état naturel. Cette méthode consiste, dans son principe général, à faire passer un courant électrique à travers deux ou trois compartiments séparés par des membranes

perméables aux ions, mais imperméables à l'eau. Dans l'appareil à trois compartiments [92, 136, 224, 248], on envoie de l'eau de mer simultanément dans chacun des trois. Les ions positifs se rassemblent dans un des compartiments extérieurs, les ions négatifs dans l'autre, tandis que l'eau du compartiment central

se déminéralise. Les saumures des compartiments extérieurs, qui représentent 80 % environ de l'eau pompée, sont expulsées.

Dans la méthode à deux compartiments [103, 277], on emploie en série deux appareils électrolytiques séparés par une chambre de précipitation. Le premier appareil a pour objet d'éliminer les ions positifs qui sont évacués avec la saumure du compartiment anodique. On fait passer l'eau du compartiment situé à la cathode par la chambre de précipitation, où le carbonate de calcium et l'hydrate de magnésium précipitent et sont évacués. Le deuxième appareil attire alors une partie des ions restants vers le compartiment cathodique d'évacuation et l'on tire du compartiment cathodique, sous forme d'eau douce, 20 % environ de l'eau brute traitée. La quantité d'énergie exigée par ce procédé a été estimée [82] à 47,5 kWh au mètre cube.

Les membranes mentionnées ci-dessus ne sont pas sélectives, c'est-à-dire que les ions positifs et les ions négatifs peuvent les traverser dans les deux sens. De ce fait, le nombre des cellules entre les électrodes est limité à trois. Comme la majeure partie de la chute de voltage est celle qui se produit aux électrodes, la con-

sommation d'énergie est inutilement élevée. S'il était possible d'avoir un grand nombre de cellules entre les électrodes, les chutes de potentiel aux électrodes se réduiraient à une petite fraction du voltage total, et l'emploi de ce procédé exigerait moins d'énergie.

L'invention récente de membranes synthétiques sélectives [48, 51, 53, 74] a rendu possible l'emploi en série de nombreux compartiments et a fait naître l'espoir qu'on réussira à mettre au point un procédé électrolytique extrêmement efficace. Les membranes actuellement employées se présentent par couples, un élément de chaque couple ayant une charge électrique positive, et l'autre élément une charge négative. Ces charges sont obtenues en incorporant aux membranes des corps provoquant l'échange d'ions ; elles provoquent la séparation des ions positifs et des ions négatifs dans des cellules salines alternées, comme le montre la figure 7.

Les membranes homogènes se composent uniquement des corps qui provoquent l'échange d'ions, tandis que les membranes hétérogènes sont des feuilles de matière plastique, par exemple de cellophane, recouvertes d'un corps provoquant l'échange d'ions. Bien

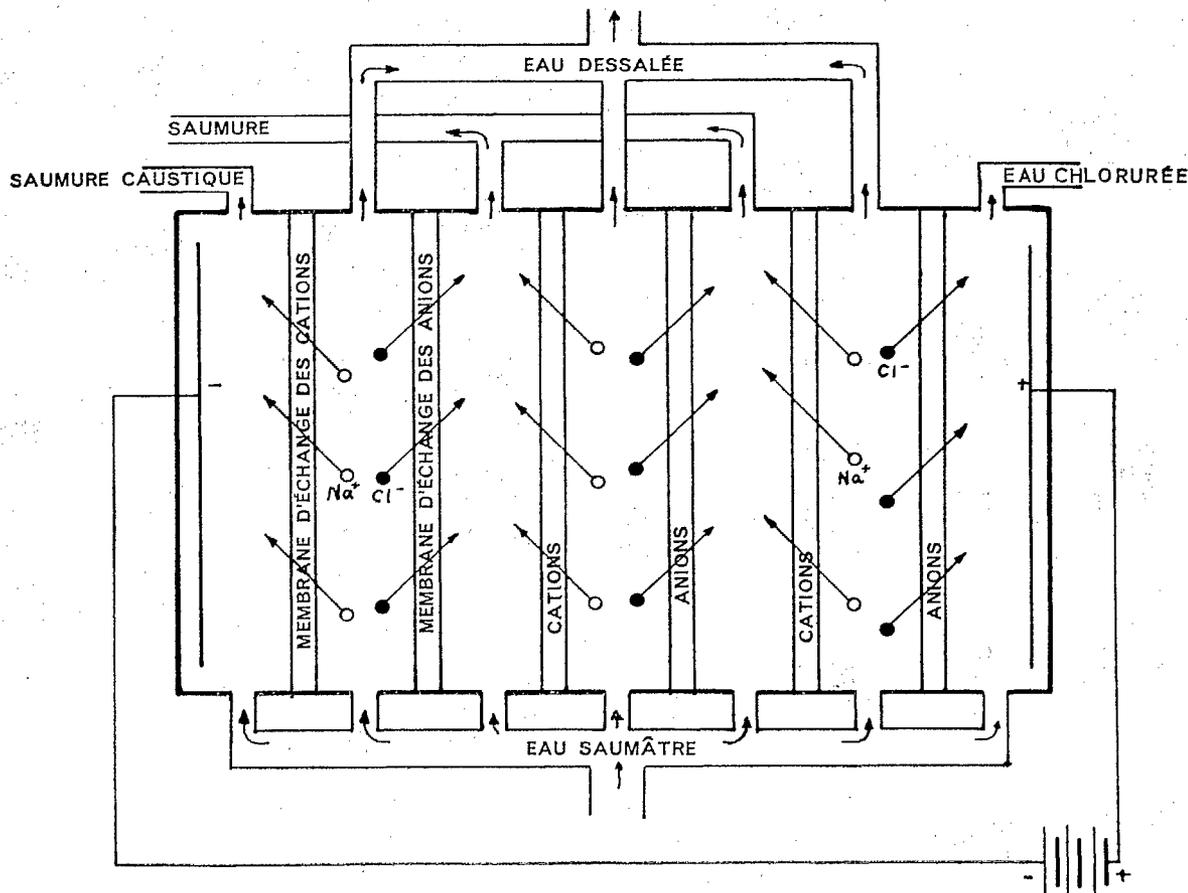


FIGURE 7. Procédé électrolytique utilisant des membranes sélectives pour la déminéralisation des eaux salines : schéma.

qu'en définitive l'effet de ces membranes soit identique au passage d'ions à travers elles, on pense généralement que, lorsqu'un ion de la polarité voulue arrive près d'une membrane, deux réactions superficielles se produisent de part et d'autre de la membrane. L'ion arrivant est absorbé d'un côté, et un ion électriquement équivalent est libéré de l'autre. Au total, la membrane ne subit aucune transformation permanente, le courant étant porté par des ions des deux côtés. Ces membranes sont souvent appelées membranes « perm-sélectives » en raison de leur caractère permanent et de leur aptitude à choisir entre les ions positifs et les ions négatifs.

On s'occupe actuellement, non seulement aux États-Unis d'Amérique, mais encore en Grande-Bretagne, aux Pays-Bas et en Afrique du Sud, de mettre au point un matériel utilisant ces nouvelles membranes. Lorsque ces appareils fonctionnent avec de l'eau de mer, la consommation d'énergie est [258] de l'ordre de 40 kWh par mètre cube; aussi l'outillage actuel est-il employé expérimentalement à la purification d'eaux salines ne contenant pas plus de 5.000 p.p.m. de sels minéraux (environ un septième de la salinité de l'eau de mer). Aux États-Unis, la société Ionics, Inc. [258] a effectué de nombreux essais en laboratoire et construit plusieurs installations pilotes capables de produire environ 3.800 litres d'eau douce à l'heure, en traitant de l'eau dont la concentration minérale initiale est d'environ 5.000 p.p.m. Une installation pilote montée sur une semi-remorque automobile [70] fonctionne en divers points du sud-ouest des États-Unis, sous les auspices

du Ministère de l'intérieur. La société Ionics possède une autre installation, d'une conception presque analogue, à Wichita Falls, dans le Texas, où elle se livre à des essais continus avec de l'eau d'une salinité initiale de 3.500 p.p.m. Une autre installation pilote de dimensions analogues est en construction à la President Brand Mine [251], dans l'État libre d'Orange, en Afrique du Sud. Cette installation, dont les plans ont été établis d'après des recherches faites en Afrique du Sud, doit servir à déminéraliser l'eau qui provient du dénoyage des mines et qui a un contenu minéral initial d'environ 4.000 p.p.m. Les résultats obtenus par ces installations pilotes devraient contribuer largement à hâter l'application commerciale du procédé.

Les évaluations du coût du procédé électrolytique utilisant des membranes « perm-sélectives » sont incertaines, car on ne possède jusqu'ici que de très faibles quantités des matériaux servant à faire ces membranes, et l'on n'a aucune donnée sur les frais de fonctionnement. Toutefois, la société Ionics [251] a estimé le coût de la déminéralisation à 35 dollars pour 1.000 m³ d'une eau contenant initialement 10.000 p.p.m. de matières minérales et à un chiffre de moitié moindre pour une eau deux fois moins chargée. Pour l'eau de mer, une fois le système mis au point, les frais seraient, d'après Michaels [225], de 150 dollars environ pour 1.000 m³; selon Gilliland [153], ils se situeraient entre 150 et 265 dollars. L'essai des installations pilotes mentionnées ci-dessus permettra de donner des chiffres plus précis.

MÉTHODES DES MEMBRANES

Le fait que les poissons qui vivent dans l'eau salée ont une chair dont le taux en NaCl n'est pas particulièrement élevé a conduit de nombreux chercheurs à se demander s'il ne serait pas possible d'élaborer un mécanisme de dessalement analogue aux phénomènes biologiques qui se produisent dans la chair du poisson. Ces phénomènes de transmission sélective de l'eau ou des ions se produisent dans tous les organismes vivants et ont fait l'objet de nombreuses études. Le principe général en paraît être que certaines membranes biologiques laissent passer par osmose les liquides, et que les particules ionisées sont triées par l'équivalent d'une charge électrostatique à la surface de la membrane. Les recherches visant à reproduire cette situation au moyen de dispositifs mécaniques se sont orientées dans deux directions, selon que la membrane est destinée à laisser passer seulement les particules ionisées, ou seulement l'eau pure, les particules ionisées étant, dans ce cas, repoussées.

À côté du procédé électrolytique qui met en œuvre des membranes « perm-sélectives », il existe d'autres applications possibles des membranes. Le phénomène de la pression osmotique, qui fait que l'eau pure traverse des membranes d'acétate de cellulose, par exemple, donne à penser qu'on parviendra peut-être à trouver des substances qui, sous la forme de feuilles, seraient capables de séparer des ions les molécules d'eau par un simple processus de filtrage. Une expérience de ce genre a été réalisée par Reid [70], qui a employé des pellicules d'acétate de cellulose et des pressions élevées. Murphy [70] emploie des membranes « perm-sélectives », la force d'impulsion étant constituée par une forte différence de pressions. Mais on n'en est encore qu'à des études préliminaires, et aucune évaluation des prix de revient n'a pu être faite.

Hassler [70, 170] expérimente un procédé qui consiste à employer deux membranes séparées par une mince pellicule d'huile ou d'air. Les deux membranes ont

des pores qui peuvent être légèrement plus grands que ceux qui servent à la séparation osmotique; derrière elles se trouve de l'eau à des pressions différentes. Du côté de l'eau salée, la pression est légèrement inférieure à celle qu'il faudrait pour causer un écoulement, mais assez forte pour provoquer à chaque pore la formation d'un ménisque d'eau. Du côté de l'eau douce, la pression est beaucoup moins forte, mais elle l'est assez pour que le diaphragme et sa pellicule de séparation restent intacts et qu'il se forme à chaque pore un ménisque d'eau de courbure moindre que celle du ménisque qui se trouve du côté de l'eau de mer. L'équilibre sur chaque ménisque exige la présence de vapeur d'eau, dont la pression est plus grande du côté

de l'eau de mer, étant donné que le rayon de courbure de ce ménisque est inférieur à celui du ménisque qui se trouve du côté de l'eau douce. La vapeur formée du côté de l'eau de mer migre donc du côté de l'eau douce, où elle se condense. Les effets thermiques dus à l'évaporation et à la condensation se produisent par un transport de chaleur à travers les intervalles remplis d'air ou d'huile (0,13 mm). Ce procédé peut donc être assimilé à un procédé de distillation utilisant la pression comme force d'impulsion, ou à un procédé osmotique utilisant une pellicule d'huile ou d'air. Comme ces recherches ne font que commencer, on ne possède aucune évaluation sûre des prix de revient.

AUTRES MÉTHODES

Dans les nombreux articles qui ont paru sur la question de la déminéralisation de l'eau, il a parfois été question du parti qu'on pourrait tirer de phénomènes tels que les ultra-sons, les courants à très haute fréquence, les gradients de concentration près d'une surface libre et la diffusion thermique. Certaines de ces suggestions ont fait l'objet d'essais préliminaires, en exécution de contrats passés avec le Département de l'intérieur des

États-Unis [77]; mais on n'a pas obtenu jusqu'ici de résultats satisfaisants. Il ne faudrait toutefois pas en conclure que les quelques phénomènes dont on a tiré parti jusqu'ici pour déminéraliser l'eau sont les seuls à pouvoir être employés avec succès. Il est probable que les progrès de la science et de la technique permettront d'utiliser efficacement de nombreux autres phénomènes.

RÉCAPITULATION

Depuis la première version de la présente étude (1951-1952), de très nombreuses recherches ont eu lieu, ainsi que l'atteste l'allongement de la bibliographie, passée de 174 à plus de 300 titres.

En 1951-1952, c'est le procédé de distillation par thermocompression qui, d'après les évaluations, semblait le moins coûteux, le dessalement de l'eau de mer par ce procédé revenant à 380 dollars pour 1.000 m³.

On pense actuellement [70, 77] pouvoir obtenir d'ici quelques années un prix de revient de l'ordre de 80 dollars grâce à des recherches plus poussées sur différentes méthodes.

Il existe aujourd'hui des installations du type terrestre qui utilisent le procédé de distillation fractionnée et produisent en traitant de l'eau de mer plusieurs millions de mètres cubes d'eau douce par jour; les plus grandes de ces installations sont, à notre connaissance, celles de Curaçao et de Koweït. Ces installations comprennent de nombreux groupes d'échangeurs

de chaleur, car le taux de production quotidienne le plus élevé passe pour être de 380 m³ par jour et par batterie d'échangeurs de chaleur et appareils accessoires. De même, il existe des installations qui produisent plusieurs milliers de mètres cubes par jour en utilisant le procédé de distillation par thermocompression. Dans ce cas, les plus gros éléments commerciaux peuvent produire journalièrement environ 95 m³ par jour et par compresseur, de sorte qu'on obtient ici encore des productions élevées en mettant en parallèle de nombreux éléments identiques. On a signalé une installation expérimentale dans laquelle un seul compresseur traite suffisamment de vapeur pour produire chaque jour 180 m³ d'eau distillée. Le procédé électrolytique utilisant des membranes « perm-sélectives » est actuellement au stade de l'installation pilote; au moins quatre installations d'un débit de 175 m³ environ traitent actuellement des eaux d'une salinité totale de quelque 4.000 p.p.m. Les appareils du type à échanges d'ions

sont employés commercialement depuis quelques années pour traiter des eaux d'une salinité totale qui va jusqu'aux environs de 2.000 p.p.m. Il semble improbable qu'avec les systèmes actuels de régénération, ce procédé puisse servir à traiter des eaux d'une salinité initiale supérieure à ce chiffre. Ces systèmes sont les seuls qui semblent avoir atteint, en 1956, le stade de l'installation pilote.

Si l'on regarde vers l'avenir, il apparaît assez clairement que les besoins en eau douce continueront à s'accroître et que le prix de l'eau douce « naturelle » s'élèvera à mesure que la distance augmentera entre le point de ravitaillement et le lieu d'utilisation. Il est également raisonnable de penser que le coût de l'eau déminéralisée obtenue par les procédés actuels

diminuera peu à peu grâce au progrès technique et au perfectionnement des appareils. Toutefois, ces progrès resteront sans doute assez faibles; dans ce cas, ils ne permettront pas de combler l'écart entre le prix de revient de l'eau déminéralisée, qui semble actuellement devoir être de 80 dollars pour 1.000 m³, et le prix maximum que l'on puisse payer pour l'eau d'irrigation, soit 32 dollars pour 1.000 m³. Pour qu'une telle réduction de prix devienne possible, il faudra, soit modifier radicalement les procédés commerciaux actuels, soit mettre au point des appareils reposant sur certains des systèmes qui ne semblent pas actuellement très prometteurs. Il est extrêmement important qu'au cours des années qui viennent, les travaux se poursuivent avec vigueur dans ces deux directions.

BIBLIOGRAPHIE

Les études traitant des nombreux aspects de la déminéralisation de l'eau de mer ont été classées par ordre alphabétique en une seule liste. Celles dont l'auteur n'est pas expressément nommé figurent sous la rubrique « Anonyme », approximativement dans leur ordre chronologique.

Ces mêmes études — désignées par leur numéro de référence — sont groupées ci-dessous d'après les principaux sujets dont elles traitent. On remarquera que beaucoup d'entre elles figurent dans plusieurs groupes.

Généralités. Aperçu historique.

11, 14, 21, 27, 28, 29, 31, 32, 39, 40, 41, 44, 49, 55, 56, 59, 61, 64, 65, 67, 68, 70, 71, 73, 75, 76, 77, 82, 83, 110, 120, 121, 127, 128, 134, 135, 136, 141, 142, 146, 150, 151, 152, 153, 161, 164, 165, 180, 182, 185, 186, 191, 197, 225, 226, 242, 248, 256, 266, 267, 269, 280, 282, 291, 294, 296, 297, 299, 302.

Propriétés de l'eau de mer et effets physiologiques.

13, 20, 23, 49, 79, 93, 127, 166, 175, 192, 205, 236, 239, 249, 261, 281.

Alimentation en eau, généralités.

9, 19, 87, 88, 186, 220, 221, 227, 259, 265, 286.

Distillation fractionnée.

12, 14, 17, 37, 42, 49, 56, 57, 60, 63, 66, 69, 77, 85, 89, 95, 102, 107, 120, 130, 141, 149, 153, 159, 161, 164, 171, 183, 185, 186, 188, 189, 191, 197, 213, 219, 242, 263, 266, 296, 297, 301.

Distillation sous pression critique et supercritique.

38, 49, 64, 70, 77, 141, 153, 174, 245, 266, 295.

Distillation par thermocompression.

33, 34, 35, 45, 46, 48, 56, 64, 70, 77, 84, 86, 115, 116, 141, 153, 173, 177, 178, 179, 197, 208, 211, 212, 214, 242, 248, 266, 268.

Distillation instantanée sous vide dans une génératrice à faible écart de température.

8, 54, 58, 64, 90, 98, 99, 101, 104, 123, 153, 185, 186, 193, 225, 240, 241, 266, 292.

Distillation solaire.

1, 2, 3, 4, 10, 15, 16, 18, 24, 25, 49, 64, 70, 77, 80, 91, 96, 100, 101, 105, 106, 117, 125, 126, 132, 133, 138, 141, 144, 145, 147, 148, 153, 155, 156, 157, 167, 168, 169, 181, 184, 185, 186, 187, 193, 196, 197, 198, 206, 210, 217, 218, 223, 228, 232, 233, 234, 250, 252, 253, 262, 283, 284, 285, 304.

Méthodes de dessalement par congélation.

22, 47, 64, 70, 72, 77, 98, 99, 129, 131, 141, 153, 166, 197, 238, 246, 257, 264, 275, 276, 288, 293, 303, 307.

Procédés chimiques.

5, 6, 7, 13, 26, 28, 29, 30, 43, 64, 70, 78, 79, 94, 108, 109, 111, 112, 113, 114, 134, 141, 153, 154, 162, 163, 172, 190, 197, 204, 215, 216, 224, 229, 230, 231, 242, 244, 255, 266, 270, 272, 273, 278, 279, 287, 289, 290.

Extraction au moyen de solvants.

64, 70, 75, 225.

Procédés électriques.

48, 50, 51, 52, 53, 62, 64, 70, 74, 81, 82, 92, 97, 103, 136, 139, 140, 141, 153, 160, 194, 195, 200, 201, 207, 208, 224, 237, 247, 248, 251, 258, 271, 272, 274, 277, 279, 298, 305, 306.

Emploi de membranes.

64, 70, 77, 119, 141, 153, 170, 197.

Autres méthodes.

137, 141, 153, 243, 260.

1. ABBOTT, C. G., *The sun and the welfare of man* (É.-U.-A.), vol. 2, 1934, 322 pages. (Smithsonian Scientific Series).
2. — « Solar distilling apparatus », *U.S. Patent*, n° 2, 141, 330, 1938.
3. — *Utilizing heat from the sun* (É.-U.-A.), 1939, 11 pages. (Smithsonian miscellaneous collections, publication n° 3530, vol. 98, n° 5.)
4. — « Utilizing sun rays », *Scientific monthly* (É.-U.-A.), vol. 51, sept. 1940, p. 195-200.
5. ADAMS, B. A., et HOLMES, E. L., « Absorptive powers of synthetic zeolites », *Journal of the Society of Chemical Industry*, vol. 54, n° 2, Londres, 1935, p. T1-T6.
6. AKEROYD, E. I., HOLMES, E. L., et KLEIN, A., « Drinking water from sea water by a chemical method », *Water and water engineering*, vol. 48, n° 594, Londres, 1945, p. 556-560.
7. AKEROYD, E. I., et al., « Drinking water from sea water by a chemical method », *Journal of the Society of Chemical Industry*, vol. 65, n° 1, Londres, 1946, p. 28-32.
8. AKOBIANOFF, L., « Rate of vapor production by water in vacuum », *Report on sea water conversion project*, University of California, 1954, 53 pages.
9. ALBAN, F. J., « The economics of water supply », *Surveyor*, vol. 72, n° 1871, Londres, 1927, p. 561-563.
10. ALT, H. L., « Sun effect and the design of solar heaters », *Heating and piping* (É.-U.-A.), vol. 7, n° 2, 1935, p. 111-118.
11. ANONYME, *The philosophical works of the Hon. Robert Boyle*, 2° éd., vol. III, Londres, 1738, p. 214-231.
12. — « The distillation of sea water », *Engineer*, vol. 59, Londres, avril 1885, p. 294.
13. — « Making sea water potable », *Iron age*, vol. 35, n° 23, 1885, p. 38.
14. — « Water-distilling plant for Egypt », *Engineer*, vol. 97, suppl. 4, Londres, 1904, p. 230-231.
15. — « Utilisation de l'énergie solaire, procédé Shuman », *Génie civil*, Paris, 11 juillet 1914.
16. — « Concours relatif à la distillation des eaux par l'action de la chaleur solaire », *Recherches et inventions*, n° 154, juin 1927.
17. — « Condensate from mine plant supplies town with water », *Coal age* (É.-U.-A.), vol. 34, n° 5, 1929, p. 292.
18. — « La stérilisation des eaux par les rayons solaires », *L'Administration locale*, vol. 54, Paris, 1930, p. 1059-1060.
19. — « Value and cost of water for irrigation in the coastal plain of southern California », *California Division of Water Resources bulletin* (É.-U.-A.), n° 43, 1933, p. 87-90.
20. — « Why we can't drink sea water », *Scientific American* (É.-U.-A.), vol. 152, n° 6, 1935, p. 330-331.
21. — « Water, water everywhere », *Scientific American* (É.-U.-A.), vol. 154, n° 3, 1936, p. 121.
22. — « Production of potable water by cold distillation », *Water and water engineering*, vol. 39, n° 477, Londres, 1937, p. 235-236.
23. — « Sea water for sanitation in the Virgin Islands », *Engineering news-record* (É.-U.-A.), vol. 119, n° 17, 1937, p. 684.
24. — « When the sun shines, how to use it », *Domestic engineering* (É.-U.-A.), 1937, vol. 150, n° 2, p. 74-76.
25. — « How to calculate solar heat on slanting roofs », *Heating and ventilating* (É.-U.-A.), vol. 36, n° 10, 1939, p. 41.
26. — « Sea water made drinkable; two chemicals remove salt », *Science news letter* (É.-U.-A.), vol. 43, 19 juin 1943, p. 388-389.
27. — « Army bread can be made with water from ocean », *Science news letter* (É.-U.-A.), vol. 45, n° 4, 1944, p. 53.
28. — « Drinking water from the sea », *Manufacturers record* (É.-U.-A.), vol. 113, n° 2, 1944, p. 44-45.
29. — « Making sea water drinkable », *American city* (É.-U.-A.), vol. 59, n° 3, 1944, p. 9.
30. — « Drinking water from sea water », *Engineer*, vol. 180, n° 4690, Londres, 1945, p. 445-446.
31. — « Drinking water from sea water : work of the Royal Naval Scientific Service », *Chemical age*, vol. 53, n° 1376, Londres, 1945, p. 437-439.
32. — « Drinking water from sea water : work of the Royal Naval Scientific Service », *Engineering*, vol. 160, n° 4166, Londres, 1945, p. 395.
33. — « Still converts salt water into safe drinking water », *Science news letter* (É.-U.-A.), vol. 47, n° 6, 1945, p. 88.
34. — « Water distillation makes successful use of vapor recompression », *Chemical and metallurgical engineering* (É.-U.-A.), vol. 53, n° 1, 1946, p. 129.
35. — « Distillation : New compressor method supplies fresh water from sea water », *Heating and ventilating* (É.-U.-A.), vol. 43, n° 2, 1946, p. 103-104.
36. — « Préparation d'eau potable à partir d'eau de mer », *Chimie et industrie*, vol. 56, n° 1, Paris, 1946, p. 14-17.
37. — « Descaling of salt water evaporators », *Marine engineering and shipping review* (É.-U.-A.), vol. 51, n° 9, 1946, p. 109-110.
38. — « Proposed stram producer evaporates high-pressure steam outside furnace », *Power* (É.-U.-A.), vol. 90, n° 10, 1946, p. 75-76.
39. — « Large-scale water purification », *Chemical age*, vol. 57, n° 1481, Londres, 1947, p. 694.
40. — « Fresh water from the ocean », *Science news letter* (É.-U.-A.), vol. 53, n° 21, 1948, p. 326.
41. — « Sea water to fresh water », *Science news letter* (É.-U.-A.), vol. 55, n° 15, 1949, p. 299.
42. — « Drinking water from sea water », *Engineering news-record* (É.-U.-A.), vol. 143, n° 6, 1949, p. 30-31.
43. — « Ion-exchange process for brackish waters », *Chemical and engineering news* (É.-U.-A.), vol. 27, n° 45, 1949, p. 3306.
44. — « Fresh water from the sea », *Engineering news-record* (É.-U.-A.), vol. 144, n° 20, 1930, p. 32-34.
45. — « Low cost distillation predicted », *Chemical and engineering news* (É.-U.-A.), vol. 29, n° 16, 1951, p. 1492.
46. — « Army improves sea water distillation », *Engineering news-record* (É.-U.-A.), vol. 146, n° 19, 1951, p. 73.
47. — « Drinking water from sea », *Shipbuilding and shipping record*, vol. 78, n° 21, Londres, 1951, p. 648.
48. — « Ion-exchange resins in continuous sheets », *Chemical and engineering news* (É.-U.-A.), vol. 29, n° 8, 1951, p. 693.
49. — *Weather control and augmented potable water supply*, Joint Hearings in Bills S. 5, S. 222, S. 798, U.S. Senate, 82nd Congress, Washington, 1951, 353 pages.
50. — « Cheap method of desalting sea water devised by Ionics, Inc. », *Commercial and financial chronicle* (É.-U.-A.), vol. 175, n° 5094, 1952, p. 878-879.

51. ANONYME, « Permionic membrane ; cheap freshwater from oceans ; low cost mineral recovery », *Engineering and mining journal* (É.-U. A.), vol. 153, n° 6, 1952, p. 123-124.
52. — « Ion exchange membranes desalt water with ease », *Chemical and engineering news* (É.-U. A.), vol. 30, n° 9, 1952, p. 898.
53. — *Permionic membrane demineralization*, Ionics, Inc., Cambridge (Mass.), 1952, 4 pages. (Bulletin n° 2.)
54. — « Power from hot water », *Engineer*, vol. 194, n° 5053, Londres, 1952, p. 719-721.
55. — « O.E.E.C. team reports on water demineralization », *Chemical and engineering news*, (É.-U. A.), vol. 31, n° 39, 1953, p. 4024.
56. — *Report of the symposium on advanced base water supply and sanitation*, U.S. Naval Civil Engineering Research and Evaluation Laboratory, Port Hueneme (Calif.), 1953, 410 pages.
57. — « Giant salt-water distillation plant ; Astro Point, Thule, Greenland », *Chemical engineering progress* (É.-U. A.), vol. 49, n° 5, 1953, p. sup. 26.
58. — « French explore sea depths for power and fresh water », *Engineering news-record* (É.-U. A.), vol. 150, n° 11, 1953, p. 38-41.
59. — « Nine contracts awarded for water desalting research », *Engineering news-record* (É.-U. A.), vol. 151, n° 11, 1953, p. 87-88.
60. — « Water for Kuwait », *Economist*, vol. 167, Londres, 4 avril 1953, p. 28-29.
61. — « Demineralization of salt water », *Chemical age*, vol. 69, Londres, 12 sept. 1953, p. 553-554.
62. — « Desalting water by ion-selective-type membranes », *Public works* (É.-U. A.), vol. 84, 8, n° 1953, p. 136.
63. — « New distilling plants », *Motorship*, vol. 38, n° 11, 1953, p. 19.
64. — *Second annual report on saline water conversion*, Washington, D.C., U.S. Dept. of the Interior, janvier 1954, 62 pages.
65. — « New test completed on sea water distillation », *Chemical engineering* (É.-U. A.), vol. 61, n° 7, 1954, p. 126.
66. — « Huge water distillation plant to boost Bermuda base supply », *Engineering news-record* (É.-U. A.), vol. 152, n° 17, 1954, p. 62.
67. — « Organization for European Economic Cooperation team reports on water demineralization methods being investigated », *Chemical and engineering news* (É.-U. A.), vol. 31, n° 39, 1954, p. 4024-4026.
68. — « Sea water desalted six ways », *Engineering news-record* (É.-U. A.), vol. 152, n° 18, 1954, p. 25.
69. — « Maxim's tubeless evaporators », *Marine engineering* (É.-U. A.), vol. 59, n° 3, 1954, p. 59-61.
70. — *Third annual report on saline water conversion*, Washington, D.C., U.S. Dept. of the Interior, janvier 1955, 125 pages.
71. — « De-salting saline waters », *Chemical age*, vol. 73, Londres, 3 sept. 1955, p. 477-480.
72. — « Now it's zone freezing, extraction of fresh water from the sea », *Chemical week* (É.-U. A.), vol. 77, n° 3, 1955, p. 84.
73. — « Water fit to drink ; roundup of 1954 », *Industrial and engineering chemistry* (É.-U. A.), vol. 47, n° 1, 1955, p. sup. 15 A.
74. — « Purifying salt water ; electro-dialysis and other methods », *Engineering*, vol. 180, n° 4674, Londres, 1955, p. 285.
75. — « Saline scale-up ; five more years to research program », *Chemical week* (É.-U. A.), vol. 76, n° 3, 1955, p. 50.
76. — « Purification of brackish water ; international cooperation in research », *Chemistry and industry*, Londres, 20 août 1955, p. 1054.
77. — *Saline water conversion, annual report of the Secretary of the Interior for 1955*, U.S. Dept. of the Interior, Washington, 1956, 78 pages.
78. ARDEN, T. V., « Industrial applications of ion exchange », *Overseas engineer*, vol. 27, décembre 1953, p. 174-178.
79. ARMSTRONG, E. F., et MIALL, L. M., *Raw materials from the sea*, Brooklyn, N.Y., Chemical Publishing Co., Inc., 1946, 196 pages.
80. ARNOLD, M. H. M., et SEABORNE, L. R., « Economics of the solar still », *Chemistry and industry*, Londres, 12 sept. 1953, p. 974.
81. — « Permionic demineralization process », *Industrial chemist and chemical manufacturer*, vol. 29, n° 342, Londres, 1953, p. 295-298.
82. AULTMAN, W. W., « Fresh water from salt », *Engineering and science monthly* (É.-U. A.), vol. 12, n° 2, 1949, p. 3-7.
83. — « Desalting sea water for domestic use », *Journal American Water Works Association* (É.-U. A.), vol. 42, n° 8, 1950, p. 786-794.
84. BADGER, W. L., « Vapor recompression systems for evaporators », *Chemical and metallurgical engineering* (É.-U. A.), vol. 28, n° 1, p. 26 ; n° 2, p. 13, 1923.
85. BADGER, W. L., SHEPARD, P. W., et BAKER, F. M., « Studies in evaporator design », *Chemical and metallurgical engineering* (É.-U. A.), vol. 23, n° 8, p. 237, 281, 390, n° 9, p. 59, 1920.
86. BALLENTINE, R., « High efficiency still for pure water », *Analytical chemistry* (É.-U. A.), vol. 26, n° 3, 1954, p. 549, 550.
87. BARNES, J. R., « Water for the U.S. industry », *Resources for freedom*, vol. 5, *President's Materials Policy Commission Report* (É.-U. A.), 1952, p. 83-98.
88. BARNUM, E. K., « Chenery Project, California », *Journal American Water Works Association* (É.-U. A.), vol. 24, n° 3, 1932, p. 325-344.
89. BAUM, R., « L'obtention d'eau potable par distillation d'eau de mer à bord des navires », *Génie civil*, vol. III, n° 9, Paris, 1937, p. 195.
90. BEAU, C., et NIZERY, A., *L'utilisation industrielle et la différence entre les eaux de la mer et les eaux de surface*, 12 pages. (Communication n° 4, section K, IV^e Conférence mondiale de l'énergie, tenue à Londres du 10 au 15 juillet 1950.)
91. BELLONI, A., « Nouveau système de distillation solaire », *Rivista maritima* (Supp. techn.), 1948, p. 223-236.
92. BILLITER, J., « Elimination of salts from water », *Transactions Electro-chemical Society* (É.-U. A.), vol. 70, 1936 p. 409-422.
93. BLACK, A. P., « Chemistry of water treatment », Part III : Stabilization », *Water and sewage works* (É.-U. A.), vol. 95, n° 10, 1948, p. 369-374.
94. BLAIN, M., « Les journées des matières plastiques et des résines synthétiques », *Génie civil*, vol. 115, n° 2, Paris, 1939, p. 36.
95. BLAUM, R., « Verdampfer and Dampfumformer für öffentliche Kraftwerke, Industriebetriebe and Schiffe », *Zeitschrift Verein Deutsches Ingenieur*, vol. 81, n° 26, Berlin, 1957, p. 753-757
96. BLOCH, M. R., FARKAS, L., et SPIEGLER, K. S., « Solar

- evaporation of salt brines », *Industrial and engineering chemistry* (É.-U. A.), vol. 43, n° 7, 1951, p. 1544-1553.
97. BOER-NIEVELD, D. Y., et PAULI, D., « Aperçu des recherches sur le dessalement de l'eau de mer, notamment par la méthode électrodialytique », *T.N.O. Report T.A.N. 270* (Conseil national central des recherches scientifiques appliquées des Pays-Bas), oct. 1952, La Haye.
 98. BOUCHEROT, P., « Utilisation rationnelle de l'eau glacée du fond des océans », *Revue universelle des mines*, vol. 17, n° 5, Paris, 1928, p. 205-214.
 99. — « Utilisation rationnelle de l'eau glacée du fond des océans », *Industrie électrique*, vol. 37, n° 861, Paris, 1928, p. 201-206.
 100. BOUTARIC, A., « L'utilisation de l'énergie thermique des océans », *Chaleur et industrie*, vol. 9, n° 100, 1928, p. 55-62.
 101. — « La chaleur solaire et son utilisation », *Chaleur et industrie*, Paris, vol. 11, nos 118, 119, 1930, p. 59, 147.
 102. BOUTE, C., et al., *Sur le traitement anti-incrustant des eaux d'alimentation de distillateurs*, 1953. (Publication n° 2 du Centre belge d'étude de la corrosion.)
 103. BRIGGS, R. E., « Electrolytic water softening for industrial purpose », *Proceedings of Sixth Annual Water Conference, Engineering Society of Western Pennsylvania*, 1954, p. 109.
 104. BRILLE, H., « Utilisation pour la production d'eau douce à bord des navires des calories perdues par l'eau de circulation des condenseurs », *Génie civil*, vol. 98, n° 25, Paris, 1931, p. 622-623.
 105. BROOKS, F. A., « Solar energy and its use for heating water in California », *Experiment station bulletin* (É.-U. A.), n° 602, 1936, 64 pages.
 106. — « Use of solar energy for heating water », *Smithsonian report* (É.-U. A.), 1939, p. 157-181.
 107. BRUCE, A. W., « Sea water evaporators for Morro Bay », *Electrical West*, vol. 115, août 1955, p. 80-82.
 108. BRYSON, H. C., « Distilled water without heat », *Discovery*, vol. 18, n° 213, Londres, 1937, p. 284-285.
 109. BURRELL, H., « Organolites », *Industrial and engineering chemistry* (É.-U. A.), vol. 30, n° 3, 1938, p. 358.
 110. BUSWELL, A. M., « Potable water from the sea », *Science* (É.-U. A.), vol. 84, n° 2181, 1936, p. 353.
 111. CALISE, V. J., « Know feedwater-treating costs before you buy », *Power* (É.-U. A.), vol. 93, n° 6, 1949, p. 100-102.
 112. — « Cooling water treatment », *Petroleum engineer* (É.-U. A.), vol. 21, nos 1, 3, 1949, p. A 33-37, A 40, A 56-58, A 60.
 113. — « Some economic factors in waste water treatment », *Chemical Engineering progress* (É.-U. A.) vol. 46, n° 7, 1950, p. 328-334.
 114. — « Hot zeolite softening », *Power engineering* (É.-U. A.), vol. 54, n° 9, 1950, p. 54-59.
 115. CAMPOBASSO, J., « Distillation of sea water by the vapor compression method », *Journal American Water Works Association*, vol. 40, n° 5, 1948, p. 547-552.
 116. CAMPOBASSO, J., et LATHAM JR., A., *Scale formation and control in compression distillation of sea water*, American Society of Mechanical Engineers Advance, Paper n° 48, pour l'assemblée annuelle de 1948, 3 pages.
 117. CAUFOURIER, P., « L'utilisation de la chaleur solaire par l'emploi d'appareils auto-évaporateurs », *Génie civil*, vol. 82, n° 14, Paris, 1923, p. 327-329.
 118. CHAPMAN, O. L., « Salt water distillation », *The reclamation Era* (É.-U. A.), vol. 35, n° 8, 1949, p. 162-163.
 119. CHAPMAN, O. L., LINEWEAVER, G. W., et JENKINS, D. S., *Demineralization of saline waters, a preliminary discussion*, Washington, U.S. Dept. of the Interior, 1952, 66 pages.
 120. CHAPMAN, W., « An account of distilling fresh water from sea water by wood ashes », *Philosophical transactions of the Royal Society*, vol. 50, part 2, Londres, 1758, p. 635-639.
 121. CLARK, F. E., « Decade of progress in submarine water purification », *Journal of American Society of Naval Engineers*, vol. 66, n° 1, 1954, p. 125-151.
 122. CLARKE, H. T., *Ion transport across membranes*, New York, 1954, Academic Press Inc., 285 pages.
 123. CLAUDE, G., « Sur l'utilisation de l'énergie thermique des mers », *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, vol. 188, n° 6, Paris, 1929, p. 431-435 et vol. 189, n° 18, 1929, p. 661-663.
 124. — « Power from the tropical seas », *Mechanical engineering* (É.-U. A.), vol. 52, n° 12, 1930, p. 1039.
 125. COANDA, Henri, « Pour changer l'eau salée en eau de mer », *Science et vie*, vol. 86, n° 443, Paris, 1954, p. 146-151.
 126. — *Process and apparatus designed for separating the liquid and the mineral elements from sea water or similar substance*, French Patent n° 647, 350 pages.
 127. CONSOLAZIO, W. V., « Drinking water from sea water », *Smithsonian report*, publication 3817, 1945, p. 153-163.
 128. COPELAND, W. R., « Fresh water from sea water for 8.4 cents per 1,000 gallons? », *Water works engineering* (É.-U. A.), vol. 108, n° 5, 1955, p. 422-448.
 129. COOPER, A. M., « Solution to our water shortage problem, possibilities of desalting ocean water », *Public utilities fortnightly*, vol. 40, 8 mai 1952, p. 607-615.
 130. CRANK, R. K., « Report of a six-day trial of the « Lillie » multiple-effect distilling plant at Dry Tortugas, Jan. 13-20, 1900 », *Journal American Society of Naval Engineers*, févr. 1900, et *Engineering news* (É.-U. A.), 29 mars 1900.
 131. CURRAN, H. M., « Fresh water extracted from salt water : is the freezing method the best? », *Refrigerating engineering* (É.-U. A.), vol. 63, n° 9, 1955, p. 45-56.
 132. DANIELS, F., et DUFFIE, J. A., *Solar energy research*, Madison (Wisconsin), The University of Wisconsin Press, 1955, 290 pages.
 133. DAVIS, G. E., « Instruments for radiometric and radiobiological investigations at the Desert Sanatorium and Institute of Research », *General electric review* (É.-U. A.), vol. 34, n° 2, 1931, p. 98-103.
 134. DAVIS, G. H., « Making sea water drinkable : Apparatus designed for cast away airmen », *Illustrated London news*, vol. 205, n° 5511, 1944, p. 663.
 135. DE HAVEN, J. C., et al., *A brief survey of the technology and economics of water supply*, Report R-258-RC, Santa Monica (California), The Rand Corporation, 1953, 55 pages.
 136. DIXEY, F., *A practical handbook of water supply*, Thomas Murby and Co., Londres, 1931, 562 pages.
 137. DONATO, G., « Natural steam power plants of Lardarello », *Mechanical engineering* (É.-U. A.), vol. 73, n° 9, 1951, p. 709-712.
 138. DORNIC, M., et BELLONI, A., *Dispositif pour la production d'eau distillée au moyen de l'énergie solaire*, brevet italien, n° 448.833 (1949).
 139. ELIASSEN, M. R., « Les métamorphoses des eaux salées », *Journée mondiale de la santé*, avril 1955.

140. ELIASSON, R., « Reclamation of saline waters by electro-dialysis shows promise », *Civil engineering*, vol. 24, n° 6, New York, 1954, p. 44-47.
141. ELLIS, Cecil B., *Fresh water from the ocean*, The Ronald Press Co., New York, 1953, 217 pages.
142. ELLIS, E. T., « Drinking water from sea water », *Dock and harbour authority*, vol. 8, n° 87, Londres, 1928, p. 71.
143. — « Drinking water from sea water », *Water and water engineering*, vol. 30, n° 351, Londres, 1928, p. 141.
144. ESTEY, R. S., et MILLER, R. A., « Transmission of solar energy through heat-absorbing glass », *Transactions Illuminating Engineering Society (É.-U. A.)*, vol. 30, n° 5, 1935, p. 403-410, 427-432.
145. FEDOSEYEV, V. A., « Russians use sun's heat to provide hot water supply », *Water works engineering (É.-U. A.)*, vol. 98, n° 10, 1945, p. 561-580.
146. FOLSOM, R. G., « Pacific Ocean-California's last water-hole », *Electrical West (É.-U. A.)*, vol. 101, n° 3, 1948, p. 104-107.
147. FRITZ, S., « Solar radiation during cloudless days », *Heating and ventilating (É.-U. A.)*, vol. 46, n° 1, 1949, p. 69.
148. — « Average solar radiation in the United States », *Heating and ventilating (É.-U. A.)*, vol. 46, n° 7, 1949, p. 85.
149. FRIULI, B., « Impianti di bordo per la distillazione di acqua di mare », *Termotecnica*, vol. 9, n° 2, 1955, p. 63-65.
150. FURNAS, C. C., *Rogers manual of industrial chemistry*, 6^e éd., New York, D. Van Nostrand Co., 2 vol.
151. GIBBS, R., « No method yet known will produce potable water from sea water at a cost competitive with most surface waters », *Chemical and engineering news (É.-U. A.)*, vol. 29, n° 27, 1951, p. 2716.
152. GIBBS, R. G., « Processes for separating salt from saline waters », *Chemical and engineering news (É.-U. A.)*, vol. 30, n° 48, 1952, p. 5016.
153. GILLILAND, E. R., « Fresh water for the future », *Industrial and engineering chemistry (É.-U. A.)*, vol. 47, n° 12, 1955, p. 2410-2422.
154. GILWOOD, M. E., et CALISE, V. J., « Mineral-free water without distillation », *Power*, vol. 89, n° 6, 1954, p. 395-396.
155. GINESTOUS, G., « L'épuration de l'eau par la chaleur solaire », *Bulletin de la Direction générale de l'agriculture, du commerce et de la colonisation*, Tunis, 1^{er} trim. 1929.
156. GINNINGS, D. C., *Multiple effect solar still*, U.S. Patent n° 2.445.350 (1948).
157. GOMELLA, C., *Déminéralisation des eaux saumâtres par distillation solaire*, communication inédite, O.E.C.E., groupe de travail n° 8, mai 1955, S.E.T.U.D.E., Alger.
158. GOUDEY, R. F., « Removal of salts from water », *Journal American Water Works Association*, vol. 32, n° 3, 1940, p. 435-439, 450.
159. GRABER, R. C., « Treatment of water on vessels », *Marine engineering and shipping review (É.-U. A.)*, vol. 54, n° 9, 1949, p. 49-52.
160. GRAYDON, W. F., et STEWART, R. J., « Ion exchange membranes, membrane potentials », *Journal of physical chemistry (É.-U. A.)*, vol. 59, n° 1, 1955, p. 86-89.
161. GREW, Nehemiah, *New experiments and useful observations concerning sea water made fresh*, 3^e éd., Londres, J. Harefinch, 1684; 20 pages.
162. GRIESSBACH, R., « Ueber die Herstellung und Anwendung neuerer Austausch-Adsorbentien, insbesondere auf Harz-basis », *Angewandte Chemie*, vol. 52, n° 11, Berlin, 1939, p. 215-219.
163. GUSTAFSON, H. B., « Ion exchange in water treatment », *Industrial and engineering chemistry (É.-U. A.)*, vol. 41, n° 3, 1949, p. 464-466.
164. HALES, S., *An account of a useful discovery to distil double the quantity of sea water by blowing showers of air up through the distilling liquor*, 2^e éd., Londres, R. Manby, 1756, 72 pages.
165. HAMPEL, C. A., « Fresh water from the sea », *Chemical and engineering news*, vol. 26, n° 27, 1948, p. 1982-1985.
166. — « Densities and boiling points of sea water concentrates », *Industrial and engineering chemistry (É.-U. A.)*, vol. 42, 1950, p. 383-386.
167. HAND, I. F., « Insolation on clear days », *Heating and ventilating (É.-U. A.)*, vol. 47, n° 1, 1950, p. 92.
168. HARDING, J., « Apparatus for solar distillation », *Minutes of proceedings. Institution of Civil Engineers*, vol. 73, Londres, 1883, p. 284.
169. HARDING, L. A., « Pyrheliometers and measurement of total solar radiation », *Heating, piping and air conditioning (É.-U. A.)*, vol. 8, avril 1936, p. 213-218.
170. HASSLER, G. L., *The use of molecular oil films in a pressure method for obtaining irrigation water from the sea*, Private paper presented at the University of California, 1950, 47 pages.
171. HAUSBRAND, E., *Evaporating, condensing and cooling apparatus*, 4^e éd., angl. (trad. par Wright, A. C., et Heastie, B.), New York, D. Van Nostrand, 1929, 465 pages.
172. HEILMAN, A., « Die chemischen Reinigungsverfahren beider Wasserversorgung der Truppe im Felde », *Gesundheits Ingenieur*, vol. 44, n° 18, 20, Berlin, 1921, p. 213, 236.
173. HEINZ, W. B., *Compression distillation*, Report 19-94, 1954, made to Saline Water Conversion Program, U.S. Dept. of the Interior, Washington D.C.
174. HELD, K. M., et al., *Extraction of fresh water from sea water in the supercritical state*, Report NDA 32-2 to Saline Water Conversion Program, 1954, U.S. Dept. of the Interior, Washington D.C.
175. HERLIHY, J. T., *Physical chemical studies of the solar evaporation of sea water*, thèse inédite, Madison (Wisconsin), Univ. of Wisconsin, 1935.
176. HILL, J. W., « The quality of water supply », *Transactions American Society of Civil Engineers*, vol. 32, 1894, p. 130-170.
177. HILLIER, H., « Scale formation in sea water distilling plants and its prevention », *Proceedings (B) Institution of Mechanical Engineers*, vol. 1B, n° 7, Londres, 1952, p. 295-322.
178. — « Scale formation in sea water distillation plants and its prevention », *Engineering*, vol. 175, n°s 4544, 4547, 4549, Londres, 1953, p. 284-285, 378-380, 442-444.
179. — « La formación de costra en las plantas evaporadoras », *Ingeniería Naval*, vol. 22, n° 223, Madrid, 1954, p. 19-34.
180. HOGG, J. E., « California's last waterhole », *Waterways magazine (É.-U. A.)*, vol. 39, n° 11, 1947, p. 2.
181. HOLLINGSWORTH, F. N., « Solar energy to provide water supply for island », *Heating and ventilating (É.-U. A.)*, vol. 45, n° 8, 1948, p. 99.
182. HOLMAN, R. L., « Our last waterhole », *Science digest*, vol. 28, n° 12, 1950, p. 43.

183. HOFFL, A., « Die Erzeugung von Zusatzwasser zur Kesselspeisung durch Verdampferapparate im Betriebe ortsfester Anlagen » (L'emploi de condenseurs pour la production d'eau additionnelle pour l'alimentation des chaudières dans les installations fixes), *Zeitschrift des Verein Deutscher Ingenieure*, vol. 57, n° 12, Berlin, 1913, p. 463-467.
184. HOTTEL, H. G., et WOERTZ, B. B., « The performance of flatplate solar heat collectors », *Transactions, American Society of Mechanical Engineers*, vol. 64, 1942, p. 91.
185. HOWE, E. D., « Fresh water from salt water », *Transactions of the American Geophysical Union*, vol. 33, n° 3, 1952, p. 417-422.
186. — « Sea water as a source of fresh water », *Journal of the American Waterworks Association*, vol. 44, n° 8, 1952, p. 690-700.
187. — *Progress report for the California State Legislature*, 1955, Institute of Engineering Research, University of California, 24 pages. (Publication n° 2, Série 75.)
188. IMPAGLIAZZO, A. M., « Distilling plant economy », *Mechanical engineering (É.-U. A.)*, vol. 69, n° 5, 1947, p. 387-390.
189. IMPAGLIAZZO, A. M., et BENT, R. M., « Low-pressure steam heated distilling plants for distillation of sea water », *Marine engineering and shipping review*, vol. 53, n° 6, 1940, p. 42-47.
190. INGLESON, H., « Preparation of drinking water from sea water », *Journal of the Society of Chemical Industry*, vol. 64, n° 11, Londres, 1945, p. 305-309.
191. IRELAND, M. L., « Economic features of low pressure evaporating and distilling plants for merchant ships », *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers (É.-U. A.)*, vol. 53, 1945, p. 38-51.
192. IRVING, L., « Acid-base equilibrium in sea water », *Science (É.-U. A.)*, vol. 80, n° 2086, 1934, p. 587.
193. JAEGER, F. M., « Big practical problem for science : power source of the future Claude-Boucherot process, solar energy », *Scientific American*, vol. 142, n° 2, 1930, p. 141-145.
194. JUDA, W., et McRAE, W. A., « Coherent ion-exchange gels and membranes », *Journal of the American Chemical Society*, vol. 72, n° 2, 1950, p. 1044.
195. JUDA, W., et al., « Ion exchange », *Annual review of physical chemistry (É.-U. A.)*, vol. 4, 1953, p. 373-398.
196. KAUSCH, O., *Die unmittelbare Ausnutzung der Sonnenenergie*, Weimar, Steinert, 1920, 192 pages.
197. KEMLER, E. N., et al., *Study of water recovery methods and equipment*, vol. 1-5, M. E. Dept. Report 5145, University of Minnesota, 1952-1953.
198. KIRFICHEV, M. V., et BAUM, V. A., « L'utilisation des rayons solaires », *Priroda*, janvier 1954.
199. KORSCHAK, H. P., et al., « Regeneration of a cation exchange resin », *Industrial and engineering chemistry (É.-U. A.)*, vol. 41, 1949, p. 1406.
200. KRESSMAN, T. R. E., « Ion exchange resin membranes and resin-impregnated filter paper », *Nature*, vol. 165, Londres, 8 avril 1950, p. 568.
201. — « Desalting brackish waters with ion exchange resin membranes », *Industrial chemist and chemical manufacturer*, vol. 30, n° 350, Londres, 1954, p. 99-101.
202. — « Ion exchange materials and their application in industry », *Chemistry and industry*, Londres, 21 janvier 1956, p. 64-69.
203. KREUTZBERG, E. C., « Big business from water », *Steel*, vol. 134, 25 janvier 1954, p. 34.
204. KUNIN, R., et MYERS, R. J., *Ion exchange resins*, New York, John Wiley and Sons, Inc., 1950, 212 pages.
205. LADELL, W. S. S., « Effect of drinking small quantities of sea water », *Nature*, vol. 153, n° 3882, Londres, 1944, p. 385.
206. LANDRY, B. A., et al. « An investigation of multiple-effect evaporation of saline waters from solar radiation », *Saline water research and development progress report*, n° 2, 1953, Washington, D.C., U.S. Dept. of the Interior, 58 pages.
207. LANGELEIER, W. F., « The electrochemical desalting of sea water with perm-selective membranes — a hypothetical process », *Journal American Water Works Association*, vol. 44, n° 9, 1952, p. 845-848.
208. — « Discussion », *Journal American Water Works Association*, vol. 44, n° 8, 1952, p. 697-700.
209. LANGELEIER, W. F., CADLWELL, D. R., et LAWRENCE, W. B., « Scale control in sea water distillation equipment by contact stabilization », *Industrial and engineering chemistry (É.-U. A.)*, vol. 42, n° 1, 1950, p. 126-130.
210. LAPPALA, R., et BJORKSTEN, J., *Development of plastic solar stills*, présenté à la Conférence sur l'énergie solaire, Tucson (Arizona), 1955. (Inédit.)
211. LATHAM, A. Jr., « How to produce pure water by compression distillation », *Power plant engineering (É.-U. A.)*, vol. 50, n° 2, 1946, p. 78-80.
212. — « Cost of extracting distilled water from sea water by compression distillation » *Mechanical engineering (É.-U. A.)*, vol. 68, n° 3, 1946, p. 221-224.
213. LEFFERMAN, Henry, « The economic production and uses of distilled water », *Proceedings Engineers Club of Philadelphia*, avril 1906.
214. LEICESTER, J., « Vapour compression distillation », *Chemistry and industry*, Londres, 31 décembre 1951, p. 1189-1193.
215. LEMAIRE, E., « L'emploi des résines synthétiques comme absorbants pour l'épuration des eaux », *Génie civil*, vol. 116, n° 21, Paris, 1940, p. 340-344.
216. LINDSAY, F. K., « High capacity cation exchangers », *Journal American Water Works Association*, vol. 42, n° 1, 1950, p. 75.
217. LOEF, G. O. G., « Demineralization of saline water with solar energy », *Saline water research and development progress report*, n° 4, Washington, D.C., U.S. Dept. of the Interior, 1954, 80 pages.
218. — « Solar distillation of sea water in the Virgin Islands », *Saline water research and development progress report*, n° 5, Washington, D.C., U.S. Dept. of the Interior, 1955, 39 pages.
219. LOMAX, E. L., « Sea water evaporators at Kuwait », *World petroleum (É.-U. A.)*, vol. 23, n° 10, 1952, p. 58-59.
220. MANSFIELD, M. G., « Philadelphia improvement program », *Journal American Water Works Association*, vol. 42, n° 1, 1950, p. 645-653.
221. MARSEAK, I., « Distillation of sea water », *Power engineering (É.-U. A.)*, vol. 55, n° 2, 1951, p. 67.
222. McELROY, Samuel, « City water supply of the future », *Engineering magazine (É.-U. A.)*, vol. 6, n° 6, 1894, p. 821-828.
223. MERLE, A., « Solar heaters for water service », *Heating and ventilating (É.-U. A.)*, vol. 37, n° 8, 1940, p. 22.
224. MEULLER, R., « Elektrochemische Gewinnung nicht-metallischer Stoffe », *Chemiker-Zeitung*, vol. 62, n° 70, Berlin, 1938, p. 621-624.

225. MICHAELS, R. W., *Desalting sea water*, thèse inédite, Madison (Wisconsin), University of Wisconsin, 1953.
226. MOORE, E. W., « The desalting of saline waters : a review of the present status », *Journal of the New England Water Works Association* (É.-U. A.), vol. 65, décembre 1951, p. 319.
227. MORRIS, S. B., « Water works management and Los Angeles progress », *Journal American Water Works Association*, vol. 42, n° 7, 1950, p. 654-664.
228. MOUCHOT, A., *La chaleur solaire et ses applications industrielles*, Paris, G. Villars, 1869, 238 pages.
229. MOUZET, M. H., « L'adoucissement de l'eau des distributions publiques par permutation au moyen des zéolites », *Génie civil*, vol. 109, n° 14, Paris, 1936, p. 281-285.
230. MURPHY, G. W., « The separation of simple electrolytes in solution by an electro-gravitational method », *Journal of the Electrochemical Society* (É.-U. A.), vol. 97, 1950, p. 405.
231. MURPHY, G. W., et BATZER, D., « Apparatus for studying electrogravitational separations », *Journal of Electrochemical Society*, vol. 99, 1952, p. 520-526.
232. NEBBIA, G., « Sull' utilizzazione dell' energia solare » (L'utilisation de l'énergie solaire), *Geofisica meteorologia*, vol. 1, n° 6, Gênes, 1953, 3 pages.
233. — « Le ricerche sui distillatori solari », (Les recherches sur l'alambic solaire), *Bollettino della Camera di Commercio Industria e Agricoltura di Bari*, vol. 37, n° 11, 12, 1953, 7 pages.
234. — « Alcuni nuovi studi sui distillatori solari », *La chimica e l'industria*, vol. 36, Gênes, 1954, p. 20-27.
235. — « L'utilizzazione dell' energia solari » (L'utilisation de l'énergie solaire), *Geofisica e meteorologia*, vol. 2, Gênes, 1954, p. 50-54.
236. NEGUS, S. S., « Physiological aspects of mineral salts in public water supplies », *Journal American Water Works Association*, vol. 30, n° 2, 1938, p. 244-264.
237. NEIHOFF, R., et SOLLNER, K., « A quantitative electrochemical theory of the electrolyte permeability of mosaic membranes », *Journal of physical and colloid chemistry* (É.-U. A.), vol. 54, 1950, p. 157-176.
238. NELSON, K. H., et THOMPSON, T. G., *Desalting of sea water by freezing processes*, Technical Report n° 13, Ref. 53-1, 1953, Dept. of Oceanography, University of Washington, Seattle, Washington.
239. NISHIKAWA, T., OKUNO, T., MAEDA, M., et OGATA, T., « Studies of ocean water taken in various parts of world », *Journal Society of Chemical Industry* (Japon), vol. 42, février 1939, p. 116.
240. NIZERY, A., *Étude sur les possibilités de l'utilisation de l'énergie thermique des mers et de l'énergie solaire*, Monaco, 1946, 47 pages, (Bulletin n° 906 de l'Institut océanographique.)
241. — « Utilization of the thermal potential of the sea for the production of power and fresh water », *Institute of Engineering Research Publication*, University of California, Berkeley (Calif.), 1954.
242. NORDELL, E., *Water treatment for industrial and other uses*, New York, Reinhold Publishing Corporation, 1951, 513 pages.
243. NOUGUER, A., « Les ressources géothermiques d'Hamam-Meskoutine », *Revue générale de l'électricité*, vol. 35, n° 19, 20, Paris, 1944, p. 653-661, 695-701.
244. O.E.C.E., *Échangeurs d'ions et distillation solaire*, rapport du groupe de travail n° 8, mai 1955.
245. OELANDER, A., et LEANDER, H., « Diagramme des phases du chlorure de sodium et de la vapeur au-dessus du point critique », *Acta chemica scandinavica*, Stockholm, vol. 4, 1950, p. 1437-1445.
246. PARKER, A., « Potable water from sea water », *Nature*, vol. 149, n° 3772, Londres, 1942, p. 184-186.
247. PARKIN JR., C. M., « Military water distillation equipment », *Military engineer* (É.-U. A.), vol. 38, n° 235, 1946, p. 468.
248. PATIN, P., « Préparation d'eau pure sans distillation », *Chimie et industrie*, vol. 19, n° 2, Paris, 1928, p. 205-213.
249. POLLARD, C. B., « Physiological effects of mineral salts in natural waters », *Journal American Water Works Association*, vol. 28, n° 8, 1936, p. 1038-1043.
250. POUILLAIN *et al.*, « Concours relatif à la distillation des eaux par l'action de la chaleur solaire » (Distillation of water with solar energy), *Recherches et inventions*, vol. 8, Paris, juin 1927, p. 205-215.
251. RAPSON, W. S., « Purification of mine water », *Optima*, vol. 5, n° 2, Johannesburg, 1955, p. 43-46.
252. RICHARD, J., « Sur la distillation des eaux salées au moyen de la chaleur solaire », *Recherches et inventions*, vol. 8, n° 160, Paris, déc. 1927.
253. — « Extraction de l'eau douce des eaux salées et de toutes substances aqueuses par la chaleur solaire », *Recherches et inventions*, Paris, 1929, p. 18.
254. — *A simple method for the extraction of fresh water from sea water, polluted water, any watery substances, or from the atmosphere, by means of solar heat*, Monaco, 1929, 27 pages. (Bulletin n° 535 de l'Institut océanographique.)
255. RICHTER, A., « Die Anwendung von Ionaustauchern auf Kunstharzbasis zur Entsalzung von Wassern », *Angewandte Chemie*, vol. 52, n° 47, Berlin, 1939, p. 679-681.
256. ROBINS, F. W., « The beginnings of water conservation », *Water and water engineering*, vol. 48, n° 596, Londres, 1945, p. 652-655.
257. ROSE, A., et HOOVER, T. B., « Research on salt water purification by freezing », *Saline water research and development progress report*, n° 7, Washington, D.C., U.S. Dept. of the Interior, 1955, 50 pages.
258. ROSENBERG, N. W., *et al.* « Results of selected laboratory tests of an ionics demineralizer », *Saline water research and development report*, n° 1, Washington, D.C., U.S. Dept. of the Interior, avril 1954, 42 pages.
259. RUDOLPH, W. E., « Water supply problems of a desert region », *Transactions American Society of Civil Engineers*, vol. 94, 1930, p. 600-625.
260. RUSSELL, L. A., « Water purification by means of ultrasonic energy », *Municipal utilities* (É.-U. A.), vol. 90, n° 9, 1952, p. 42.
261. RYAN, W. J., *Water treatment and purification*, 2^e éd., New York, McGraw-Hill, 1946, 270 pages.
262. SAVORNIN, J. H., *Efficiency of various types of solar stills*, Symposium on Solar Energy, Phoenix and Tucson, 1955. (Inédit.)
263. SCHRODER, Hugo, « Die Destillation des Zusatzwassers in Kraftwerken » (La distillation d'eau additionnelle dans les usines génératrices), *Zeitschrift des Verein Deutscher Ingenieur*, vol. 58, n° 45, Berlin, 1914, p. 1540-1544.
264. SHAFER, L., *et al.*, « An analysis of the Zarchin scheme for demineralizing sea water by cold distillation », *Institute of Engineering Research publication*, University of California, Berkeley (Calif.), 1954.

265. SHAW, A. L., et CHASE, E. S., « What is good water worth? » *Engineering news-record* (É.-U. A.), vol. 119, n° 16, 1937, p. 641-644, 744.
266. SHERWOOD, T. K., « Fresh water from the sea », *Technology review* (É.-U. A.), vol. 57, n° 1, 1954, p. 15-20.
267. SHIRRA, J., « Sea water and the use of the salinometer », *Mechanical engineer*, Londres, 17 août 1907.
268. SKERRET, R. G., « Compression distillation of sea water », *Compressed air magazine* (É.-U. A.), vol. 51, n° 5, 1946, p. 123-126.
269. SMITH, E. C., *A short history of naval and marine engineering*, Londres, Cambridge University Press, 1938, 376 pages.
270. SPEALMAN, C. R., « Chemical removal of salts from sea water to produce potable water », *Science* (É.-U. A.), vol. 99, n° 2566, 1944, p. 184.
271. SPIEGLER, K. S., « On the electrochemistry of ion-exchange resins », *Journal of Electrochemical Society* (É.-U. A.), vol. 100, n° 11, 1955, p. 303 C-316 C.
272. SPIEGLER, K. S., et CORYELL, C. D., « Electromigration in a cation exchange resin », *Journal of physical chemistry* (É.-U. A.), vol. 56, n° 1, 1952, p. 106-113.
273. SPIEGLER, K. S., JUDA, W., et CARRON, M., « Counterflow regeneration of cation exchanger in partial demineralization of brackish waters », *Journal American Water Works Association*, vol. 44, n° 1, 1952, p. 80-88.
274. STAUFFER, R. E., *Electrodialysis*, voir 300.
275. STEINBACH, A., « Production of fresh water from sea water by freezing », *Refrigerating engineering* (É.-U.A.), vol. 59, n° 9, 1951, p. 879.
276. — « Gewinnung von Trinkwasser aus Meerwasser durch Ausfrierem », *Chemie-Ingenieur-Technik* (Allemagne), vol. 23, n° 12, 1951, p. 296-298.
277. STREICHER, L., « Two compartment cell softens water electrolytically », *Civil engineering* (É.-U.A.), vol. 16, n° 7, 1946, p. 312-313.
278. STREICHER, L., et POWERS, A. E., « Cation exchangers for municipal water softening », *Journal American Water Works Association*, vol. 42, n° 1, 1950, p. 81-92.
279. STREICHER, L., et al., « Demineralization of water by electrolytic and ion exchange processes », *Industrial and engineering chemistry* (É.-U.A.), vol. 45, n° 11, 1953, p. 2394-2401.
280. STROBEL, J. J., « Saline water conversion », *Public works* (É.-U.A.), vol. 86, 1955, p. 92.
281. SVERDRUP, H. O., JOHNSON, M. W., et FLEMING, R. H., *The oceans*, New York, Prentice-Hall Inc., 1946, 1.060 pages.
282. TAYLOR et MAURY, *Writings of Thomas Jefferson*, vol. 7, Washington, D. C., 1854, p. 455-460.
283. TELKES, M., « Fresh water from sea water by solar distillation », *Industrial and engineering chemistry* (É.-U.A.), vol. 45, n° 5, 1953, p. 1108-1114.
284. — *Solar distillation to produce fresh water from sea water*, Publication n° 22, Solar Energy Conversion Project, Massachusetts Institute of Technology (É.-U.A.), 6 avril 1951, 34 pages.
285. — « Solar distiller for life rafts », *Office of Scientific Research and Development Report PB 21120*, Office of Technical Services U.S.A., 19 juin 1945, 24 pages.
286. THOMAS, F., « Value of water in southern California », *Civil engineering*, vol. 3, n° 10, 1933, p. 555-559.
287. THOMPSON, J., et MC GARVEY, F. X., « Some practical aspects of deionization », *Proceedings Eighth Annual Water Conference Engineers Society of Western Pennsylvania*, 1947, paper n° 8.
288. THOMPSON, T. G., et NELSON, K. H., « Desalting sea water by freezing », *Refrigerating engineering* (É.-U.A.), vol. 62, n° 7, 1954, p. 44-48.
289. TIGER, H. L., et SUSSMAN, S., « Demineralizing solutions by a two-step ion exchange process », *Industrial and engineering chemistry* (É.-U.A.), vol. 35, n° 2, 1943, p. 186-192.
290. TIGER, H. L., SUSSMAN, LANE et CALISE, « Desalting sea water — a practical chemical method », *Industrial and engineering chemistry* (É.-U.A.), vol. 38, n° 11, 1946, p. 1130-1137.
291. TRIBUS, M., *The thermodynamics of separating fresh water from the sea*, Los Angeles, 1955. (Inédit.)
292. TROLLER, A., « L'énergie thermique des océans, le procédé Claude-Boucherot », *La nature*, n° 2786, Paris, 1928, p. 504-508.
293. VACINO, Eusebio, et VISINTIN, Bruno, « La production d'eau potable par la congélation de l'eau de mer », *Annali di chimica applicata*, vol. 35, Rome, 1945, p. 181.
294. VAUGHN, T. H., et al., « New developments in army sea water laundering », *Industrial and engineering chemistry* (É.-U.A.), vol. 41, n° 1, 1949, p. 112-119.
295. VON PLATEN, B. C., *Process for removing dissolved salts from the liquid solvent*, U.S. Patent n° 2, 520, 168, 1950.
296. WALKER, W. H., et al., *Principles of chemical engineering*, 3^e éd., New York, McGraw-Hill, 1937, 749 pages.
297. WEBER, A. L., et ROBINSON, C. S., *Evaporation*, New York, Chemical Catalog Co., 1926, 493 pages.
298. WEGELIN, E., Déminéralisation d'eau salée par électrodialyse, *Bulletin du Centre belge d'étude et de documentation des eaux*, vol. III, n° 21, 1953, p. 182-186.
299. WEICHERS, S. A., et VAN HOEK, C., « Water desalting », *Research*, Londres, vol. 6, n° 5, 1953, p. 192-194.
300. WEISSBERGER, A., *Technique of organic chemistry*, Interscience Publishers, Inc., New York, 1950. Le volume III de cette série s'intitule *Electrodialysis* et a été écrit par R.E. Stauffer.
301. WESTBERG, J. E., « How distilling fresh water from sea water pays off », *Marine engineering and shipping review* (É.-U.A.), vol. 57, n° 3, 4, 1952, p. 70-72, 76-82.
302. WESTON, R. S., « Purification of salt water », *Journal New England Water Works Association* (É.-U.A.), vol. 25, n° 3, 1911, p. 386-391.
303. WHITMAN, W. G., « Elimination of salt from sea water ice », *Refrigerating engineering* (É.-U.A.), vol. 13, n° 3, 1926, p. 95.
304. WILSON, B. W., *The desalting of bore water by solar distillation*, Serial n° 71, Melbourne, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1954, 154 pages.
305. WINGER et al., « Electrodialysis of water using a multiple membrane cell », *Industrial and engineering chemistry* (É.-U.A.), vol. 47, n° 1, 1955, p. 50-60.
306. WYLLIE, M. R. J., et PATNODE, H. W., « The development of membranes prepared from artificial cation exchange materials », *Journal of physical and colloid chemistry* (É.-U.A.), vol. 54, 1950, p. 204-227.
307. ZARCHIN, A., « Demineralizing of sea water by freezing », Israeli Patent n° 7764, 1953.

I N D E X

- adaptation aux sels, 19.
- alambics, 78, 90.
- alcalin, sol, 14, 40.
- alcalis, tolérance, 44.
- Ambrust cup, 78.
- antitoxicité, 13.
- Argentine, 63.
- Australie, 59.
- betterave à sucre, 58.
- bicarbonates, 52.
- bilan de l'eau et des sels, 22.
- biologie végétale, 14.
- bore, 11.
- Brésil, 64.
- calcium, 12, 50.
- Canada, 65.
- céréales, 57.
- Chili, 63.
- chimiques, procédés, 94.
- chlore, 11.
- chlorures, 51.
- classification des sols salins et alcalins, 25, 40.
- climatiques, problèmes régionaux, 23.
- composition de l'eau de mer, 80.
- congélation, 92.
- coton, 58.
- croissance des plantes, 38, 46.
- déminéralisation, 81.
- distillation, 79.
 - fractionnée, 82.
 - par thermocompression, 85.
 - solaire, 90.
 - sous pression critique et supercritique, 85.
 - sous vide, 87.
- eaux utilisables pour l'irrigation, 19, 28.
- électriques, méthodes, 95.
- emploi des eaux salines pour l'irrigation, 19.
- engrais, sel, 18.
- Équateur, 64.
- États-Unis d'Amérique, 66.
- évolution des plantes en croissance, 17.
- expérimentation, plantes cultivées, 17.
- fruits, 58.
- génératrice à faible écart de température, 87, 88.
- germination
 - plantes cultivées, 17, 27.
 - tolérance aux sels et germination, 53.
- halophytes
 - et plantes cultivées, 26.
 - spécificité, 16.
- humidité du sol, 46.
- Inde, 61.
- ions, effets toxiques, 49.
- ioniques, équilibres, 12.
- irrigation, 19, 28.
- lin, 58.
- magnésium, 12, 50.
- membranes sélectives, 96, 97.
- mer, eau, 77.
- Mexique, 64.
- microflore, 15.
- minéraux, éléments, 11, 12.
- nature des eaux d'irrigation, 19.
- nitrate, 53.
- observation des plantes cultivées, 17.
- O.E.C.E., 79.
- origine des eaux d'irrigation, 19.
- Pakistan, 61.
- Pérou, 64.
- physiologie végétale, 11.
- plantes
 - adultes, 18.
 - cultivées, 17; et halophytes, 26.
 - fourragères, 57.
 - physiologie, 11.
- potassium, 12, 50.
- pression osmotique, 46.
- prix de revient de l'eau, 82.
- qualité
 - de l'eau d'irrigation, 29, 41.
 - des récoltes, 18.
- résistance au chlore, 27.
- riz, 58.
- salin, sol, 14, 40.
- salinisation, 14.
- salinité, 16, 18.
- sel(s), 11.
 - comme engrais, 18.
 - effets sur les végétaux, 13.
- sodium, 12, 49.
- sol(s)
 - effets des eaux d'irrigation sur, 20.
 - influence des sols sur la croissance des plantes, 46.
 - salins, 14.
 - salins et alcalins, classification, 25, 40.
 - solution du, 15.
- solods, 15.
- solonchaks, 15.
- solonetz, 15.
- solution du sol, 15.
- solvants, 95.
- soufre, 11.
- spécificité de la tolérance aux sels, 55.
- sulfates, 52.
- telluriques, eaux, 23.
- thermocompression, distillation, 85.
- tolérance
 - aux alcalis, 44.
 - aux sels, 19.
 - et germination, 53.
 - spécificité, 55.
- toxicité, 13.
- utilisation de l'eau de mer, 77.
 - pour l'irrigation, 19, 28.
- végétation
 - effets des eaux d'irrigation, 20.
 - naturelle, 16.