

COURS "LES SOLS SALES"

J.P. MONTOROI

Département Eaux Continentales de l'ORSTOM

Université de PARIS XII

D.E.S.S. Gestion des systèmes agro-sylvo pastoraux en zones tropicales

BONDY, Janvier 1993

CARACTERES GENERAUX

DEFINITION

Sols présentant des sels plus solubles que le gypse (sols gypsiques) et la calcite (sols calciques): sels chlorurés (NaCl, KCl, MgCl₂, CaCl₂), sulfatés (Na₂SO₄, MgSO₄), bicarbonatés (NaHCO₃), carbonatés (Na₂CO₃) ou sels plus ou moins hydratés.

Autres appellations: sols halomorphes, sols salsodiques.

La formation des sols salsodiques est liée à la présence de l'ion Na⁺, cation dominant, qui existe sous deux formes:

- une forme saline (NaCl, Na₂SO₄, NaHCO₃, Na₂CO₃),
- une forme échangeable liée au complexe organo-minéral.

Elle nécessite:

. une condition de station: existence d'une source locale de sodium (nappe salée, dépôt sédimentaire salin, matériau d'altération d'une roche éruptive riche en minéraux sodiques),

. une condition climatique permettant la conservation de l'ion Na⁺ dans le sol: élimination par drainage en climat humide, maintien dans les zones arides (exception pour les sols de bordure de mer où le sodium est périodiquement renouvelé après son élimination par les pluies).

La condition de station peut être acquise secondairement (=salinisation secondaire):

- contamination éolienne par les embruns,
- contamination anthropique par la mise en valeur agricole (eaux d'irrigation, aménagements hydro-agricoles, amendements, effluents industriels...)

LOCALISATION GEOGRAPHIQUE

Les sols salés existent:

- sous climat sec (semi-désertique, steppique, tropical sec) où la forte évaporation limite le drainage,

- sous climat aride en bordure des dépressions salées sub-désertiques (sebkhas et chotts en Afrique du Nord, playas en Amérique du Sud, takyr en Asie centrale) et dans les grandes vallées irriguées (Nil, Euphrate, Colorado, vallées du Moyen-Orient),

- sous climat humide en bordure de mer (polders et marais côtiers en climat tempéré, mangroves en climat tropical humide et équatorial).

Les sols salés sont en conditions naturelles:

- . soit dépourvus de végétation lorsque la salinité est très élevée,
- . soit colonisés par une végétation spécialisée: espèces halophytes.

PROCESSUS D'EVOLUTION

Deux processus d'accumulation:

* la **salinisation** = accumulation de sels solubles neutres (action floculante des sels sur les argiles).

On distingue plusieurs dynamiques de salinisation ou de désalinisation au sein d'un profil de sol (profil salin), ces dynamiques variant dans l'espace et le temps:

. un processus ascendant de salinisation: salinité maximale en surface (nappe salée peu profonde, végétation halophyte très résistante mais peu couvrante),

. un processus temporaire de désalinisation: salinité maximale entre la surface et la nappe, transfert des sels vers le bas par apport d'eau en surface (pluie ou irrigation),

. un processus descendant de salinisation lié à une bonne couverture végétale (pelouses à halophytes) favorisant l'infiltration de l'eau et l'entraînement des sels en profondeur,

. un processus de salinisation après un processus de désalinisation (caractéristique des zones inondables).

* la **sodisation** = saturation progressive du complexe organo-minéral par l'ion Na^+ (présence d'une nappe salée proche de la surface contenant une concentration en sodium supérieure à celle des ions Ca^{++} et Mg^{++}),

Un processus de transformation physique et chimique:

* l'**alcalisation** = hydrolyse des argiles sodiques libérant le sodium dans la solution du sol (sous forme de Na_2CO_3 ou $\text{Na}(\text{CO}_3\text{H})$): le pH augmente, les argiles se dispersent, se dégradent et dans certains cas peuvent être lessivées (action des eaux pluviales).

L'évolution chimique est:

. progressive: la sodisation et l'alcalisation (= alcalinisation) est indirecte lorsque la source de sodium est une nappe salée qui s'abaisse ou se dilue,

. rapide: l'alcalinisation est directe lorsque le sodium est fourni par l'altération d'une roche éruptive sodique.

. plus complexe en présence du soufre (en bordure de mer): existence d'un équilibre sulfure-sulfate lié à l'inondation du sol.

LES DIFFERENTS SOLS SALSODIQUES

- **les sols salins**: = **salisols (RPF)**

nappe salée riche en sodium,

profil AC, structure non dégradée,

pH < 8.7, CE > 4 dS/m)

* **sols salins à complexe calcique** = **solontchak calciques**

. milieu continental (lagunes sub-désertiques),

. sels neutres sodiques associés à des sels calciques et magnésiens: efflorescences blanches plus ou moins hydratée: "salant hygroscopique",

. $\text{Na}/\text{T} < 15\%$, structure grumeleuse.

* **sols salins à complexe sodique** = **solontchak sodiques**

. surtout en milieu marin (lagunes côtières),

. $\text{Na}/\text{T} > 15\%$, structure poudreuse en surface,

. sels neutres à faciès chloruro-sulfaté (NaCl , Na_2SO_4 , MgSO_4): "salant blanc" typique,

. risque d'alcalinisation par drainage de la nappe.

- **les sols salins à sulfato-réduction** (riches en sulfures de fer réduit) = sols de polders et de mangroves aménagés sur alluvions marines récentes (influence d'une nappe marine) riches en argile et en matière organique, milieu initialement réducteur (réduction bactérienne des sulfates de l'eau de mer en sulfures de fer noir dans le sol ou en pyrite framboïdale dans les racines), risque d'acidification par oxydation des sulfures en acide sulfurique.

* forme réduite = **thiosols (RPF)**

- . horizon sulfidique ou thionique: sans consistance, très plastique, couleur grise avec des taches noires, pH neutre,
- . matière organique de type anmoor évoluant en forte anaérobiose (odeur fétide) = gley noir

* forme oxydée = **sulfatosols (RPF)**

- . abaissement naturel ou artificiel de la nappe salée
- . horizon sulfaté: aération superficielle et eaux de pluies provoquent le dessalage du profil et l'oxydation des sulfures (acidification plus ou moins forte, pH allant jusqu'à 2): précipitation du fer en jarosite (taches jaunes, sulfate ferrique de K et/ou de Na) et en oxydes (taches rouille), structuration en surface, efflorescences de gypse ou de sels d'Al.

- **les sols sodiques alcalins** (ou à alcalis) = **sodisols (RPF)**

salinité faible, sels alcalins (carbonates)

profil A(B)C ou ABtC,

Na/T > 15%, pH > 8.5 allant jusqu'à 10,

* **sols alcalins non lessivés** = **solontchak-solonetz** (anciennement sols à alcalis)

- . profil A(B)C, début de l'alcalinisation
- . dispersion et mise en solution possibles de la matière organique: efflorescences d'humates alcalins ("salant noir"),

* **sols alcalins lessivés** = **solonetz**

- . dispersion des argiles et début de leur dégradation
- . migration des argiles: horizon Bt compact à structure colonnaire arrondie (horizon natrique), revêtements d'argiles et d'amorphes organo-minéraux,

* **sols alcalins dégradés** = **soloth ou solod**

- . acidification superficielle avec formation d'un moder acide
- . alcalinisation à la base avec une structure prismatique fortement dégradée

- formation des sels par évaporation de l'eau de mer

composition ionique d'une eau de mer en g %.

Cl⁻ 19,0
 Na⁺ 10,6
 SO₄= 2,7
 Mg⁺⁺ 1,3
 Ca⁺⁺ 0,4
 K⁺ 0,4
 -
 HCO₃ 0,1
 autres 0,1

composition chimique du cristallisé après évaporation g %.

NaCl . 26,8
 MgCl₂ 3,3
 MgSO₄ 2,2
 CaSO₄ 1,3
 KCl 0,7
 CaCO₃ 0,1
 autres 0,2

- Lithosphère

0,5 % Cl- 3% Na₂O
 0,5 % SO₄= 3,6% MgO

- Minéraux sodiques

- . plagioclases sodiques
- . néphéline (féldspathoïde)
- . riebeckite (amphibole)
- . zeolithes (analcime, sodalite)

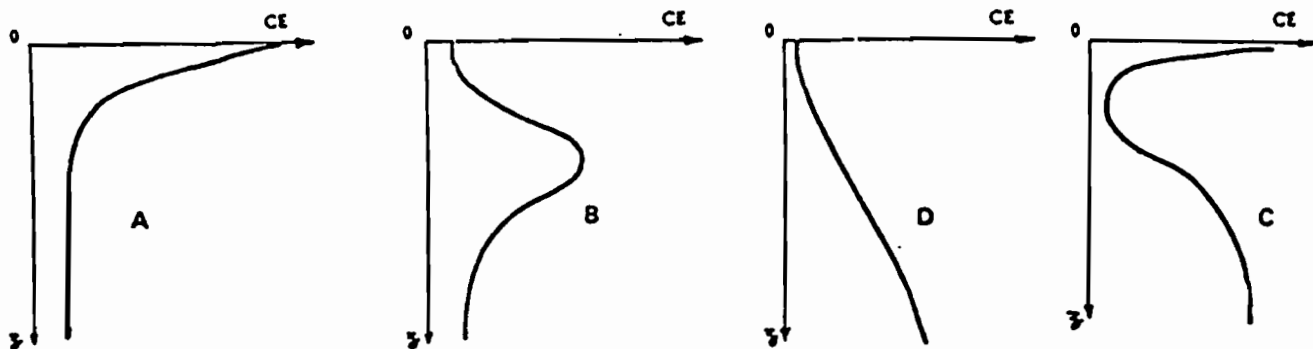
- Evaporites

NaCl	halite
MgSO ₄ , 7H ₂ O	epsomite
Na ₂ SO ₄ , 10H ₂ O	mirabilite
MgCl ₂ , 6H ₂ O	bischofite
CaMg ₂ Cl ₆ , 12H ₂ O	tachydrite
Na ₂ CO ₃	natron
Na ₂ CO ₃ NaHCO ₃	trona
2Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃	burkeite
CaSO ₄ , 2H ₂ O	gypse

Sols affectés par les sels dans différents continents et sous-continents (10³ hectares)

Amérique du Nord	15 755
Mexique et Amérique Centrale	1 965
Amérique du Sud	129 163
Afrique	80 608
Asie du Sud	87 608
Asie du Nord et du Centre	211 686
Asie du Sud-est	19 983
Australie	357 330
Europe	50 804
Total	954 832

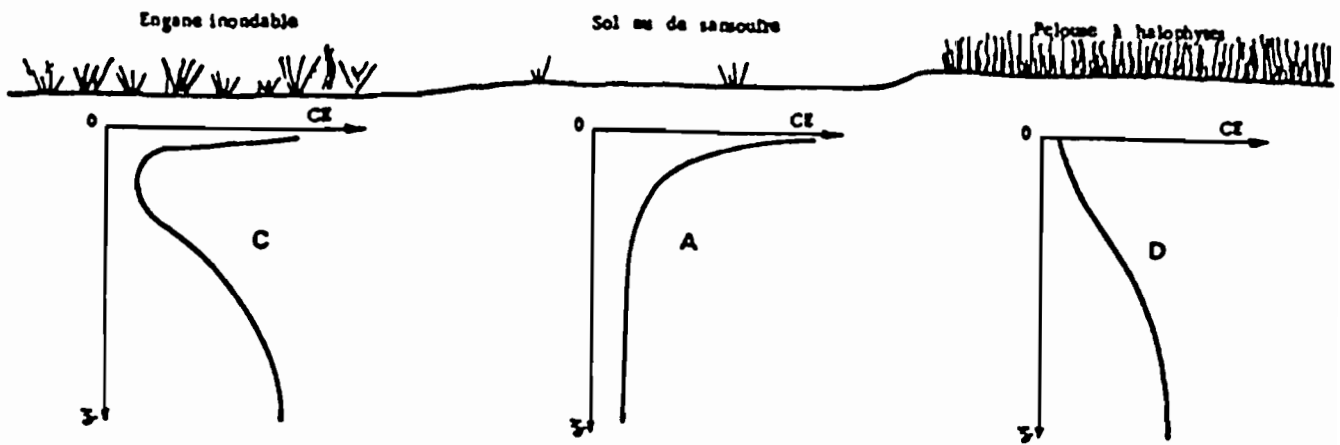
(d'après Szabolcs [15])



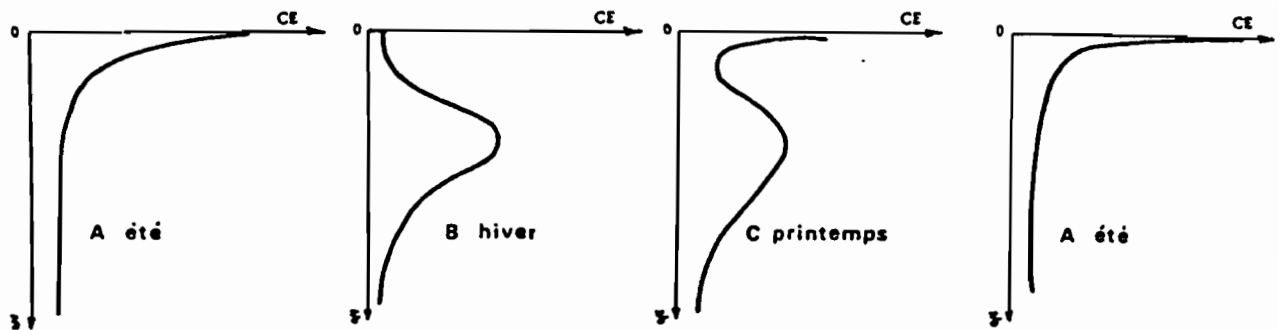
Formes de profils salins

fonctionnement du sol halomorphe	type de paysage et végétation	type de profil salin
salinisation <u>per ascensum</u> - nappe salée peu profonde	"sansouire" de Camargue : hypersalinité faible : recouvrement végétal : (sols nus) : <u>Arthrocnemum glaucum</u>	type A : surtout en été
désalinisation temporaire	zones inondables : pendant la saison : humide : <u>Salicornia fruticosa</u>	type B : surtout en période humide
salinisation atténuée	pelouse à recouvrement végétal dense : graminées+halophytes	type D : toute l'année
resalinisation	zones inondables : marais salés	type C : en été

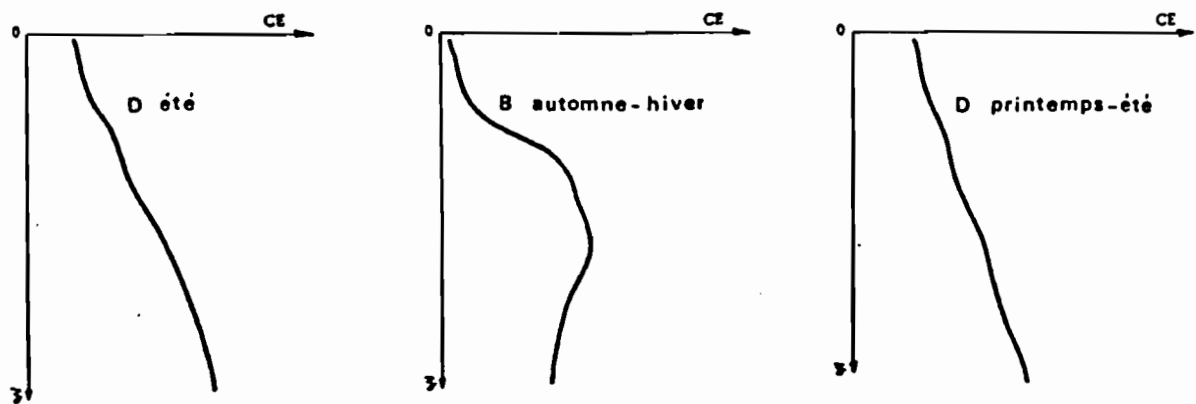
Les quatre types de profil salin et le fonctionnement du sol halomorphe



Distribution estivale des formes dans le paysage



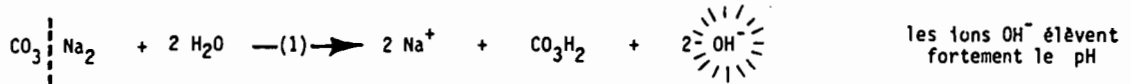
Variations saisonnières du profil salin dans le sol nu de type limons/sables



Variations saisonnières du profil salin dans le sol de pelouse halophile

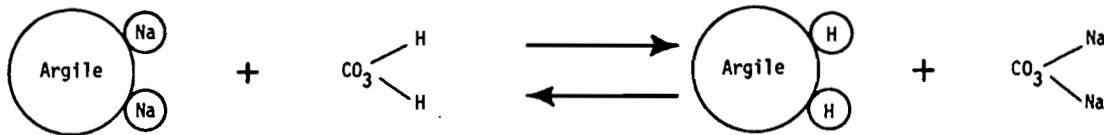
QUELQUES RÉACTIONS CHIMIQUES POUR COMPRENDRE LE COMPORTEMENT DES SOLS SALINS (ou salés) ET DES SOLS SODIQUES

I - UN "SEL ALCALIN" (provenant de la neutralisation d'un acide FAIBLE par une base FORTE) EST FORTEMENT DISSOCIÉ LORSQU'IL EST MIS EN SOLUTION. C'EST CE QUI SE PASSE AVEC LE CARBONATE DE SOUDE CO_3Na_2 OU LE BICARBONATE DE SOUDE CO_3HNa



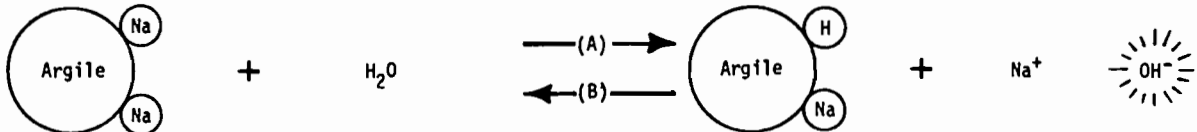
II - CETTE RÉACTION EXPLIQUE L'ÉLEVATION DU pH, SOUS L'EFFET DE L'EAU DE PLUIE, DES SOLS SODIQUES (C'est-à-dire dont l'argile fixe une forte proportion de sodium)

La pluie dissout le CO_2 de l'air et de la couche humifère, pour former de l'acide carbonique CO_3H_2 . En présence de l'argile sodique, il y a formation de carbonate et bicarbonate de soude CO_3Na_2 et CO_3HNa



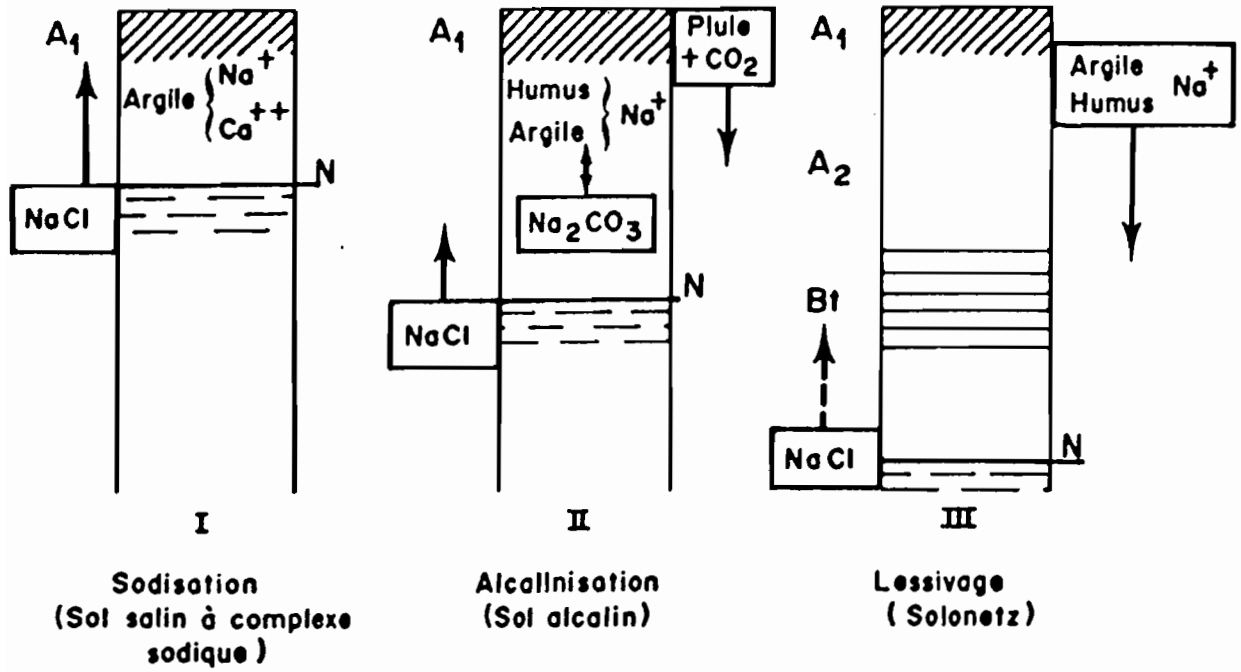
Le CO_3Na_2 formé se dissocie fortement (réaction 1) : l'abondance des ions OH^- élève fortement le pH.

III - UNE AUTRE RÉACTION EXPLIQUE CETTE MEME ÉLEVATION DU pH EN PRÉSENCE D'EAU DOUCE APPORTÉE PAR L'IRRIGATION



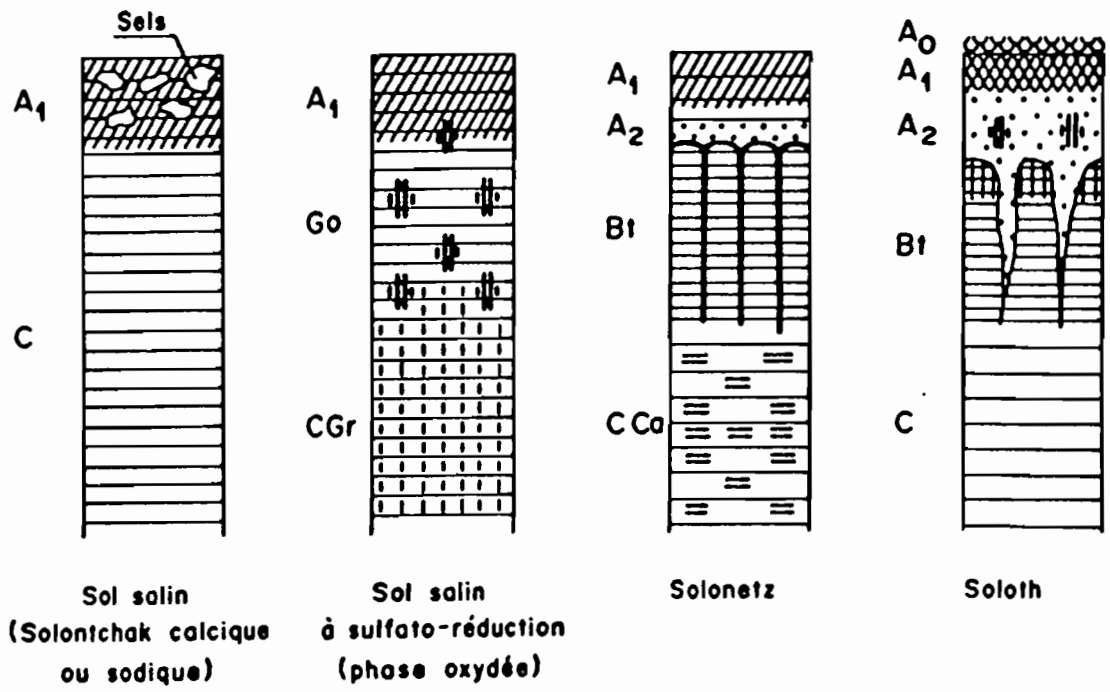
En présence d'eau douce, la réaction se déplace dans le sens A : le pH s'élève, les ions OH^- dispersent l'argile.

En présence d'eau salée apportée par remontée d'une nappe, la dissociation même faible de NaCl déplace la réaction dans le sens B : l'argile reste floculée par les ions Na^+ , et le pH reste neutre.



N : Nappe salée

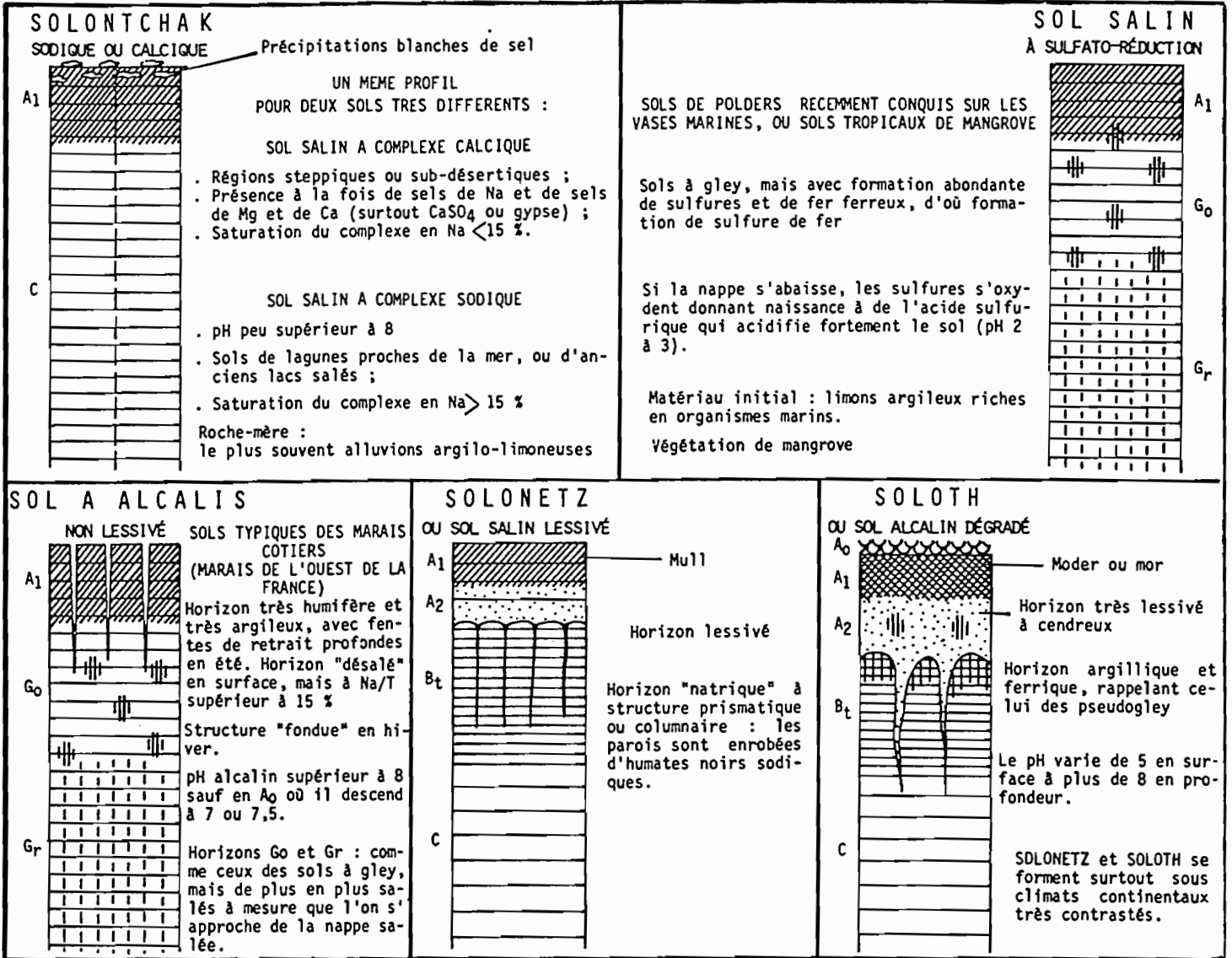
Evolution de sols salins par abaissement de la nappe salée (alcalinisation indirecte)



Profils de sols salsodiques

LES PRINCIPAUX PROFILS DE SOLS SALINS ET SODIQUES

(D'après Ph. DUCHAUFOR, Pédologie Tome I - 1977 - Masson)



CONTRAINTE ET POTENTIALITES

ACTION DES SELS

- sur les plantes:

. ralentissement de la croissance dû à l'augmentation de la pression osmotique dans la solution du sol: la disponibilité en eau diminue car le végétal ne peut exercer une force de succion suffisante: baisse de rendement des cultures, jaunissement voire mort des végétaux.

Il existe un seuil de résistance variable selon les espèces végétales: en général 4 dS/m, allant de 1 dS/m (fraisier) à 12 dS/m (palmier).

. toxicité des sels: effet spécifique de certains sels qui s'ajoute à l'effet de la pression osmotique (NaCl est plus toxique que Na_2SO_4 qui est plus toxique que Na_2CO_3); effet indirect par modification du milieu (Na_2CO_3 augmente le pH qui induit le blocage des oligo-éléments). Le bore, qui est un élément indispensable à la croissance des plantes, a un seuil de carence voisin du seuil de toxicité (environ 1.5 ppm).

. action indirecte par le pH: sensibilité des plantes à des pH alcalins supérieurs à 8.

- sur la structure des sols:

La présence de sodium échangeable provoque, après arrosage (pluie ou irrigation) une dégradation de la structure: sols compacts à sec et capacité d'infiltration limitée (porosité obstruée par les particules fines dispersées): la lixiviation des sels est bloquée.

Au cours du dessèchement et de la remontée de sels par évaporation, l'argile ayant pris en masse et s'étant fissurée peut refloculer et donner de petits agrégats (structure en pseudo-sable).

La baisse de la perméabilité dépend de la nature des anions présents dans la solution: avec le sodium, le risque diminue des carbonates aux sulfates et ensuite aux chlorures.

- sur les micro-organismes:

Adaptation aux sels de micro-organismes tels que les Actinomycètes et Pseudomonas. Les Rhizobiums, fixateurs de l'azote atmosphérique, et Thiobacillus oxydans, responsable de l'oxydation des sulfures, sont actifs en conditions salines.

La nature et la concentration des sels sont à considérer pour évaluer l'impact de la salinité sur les processus d'ammonification et de nitrification.

LE DIAGNOSTIC DES CONTRAINTE

Les contraintes à la mise en valeur agricole sont:

- la présence de sels solubles dans la solution du sol qui est estimée:

. par une aptitude à conduire le courant électrique: mesure de la conductivité électrique (CE) qui est une mesure globale de la salinité (à l'échelle de la solution, de l'horizon, du profil de sol),

. par une charge minérale dissoute: mesure du résidu sec (CD), également estimation globale,

. par une concentration ionique (C) soit pour un ion, soit pour l'ensemble des anions et des cations: mesure fine de la salinité qui nécessite une analyse chimique de la solution.

- la présence de sodium échangeable qui est estimée:
 - . par une détermination analytique des ions échangeables (Na^+ , K^+ , Ca^{++} et Mg^{++}) et de la capacité d'échange du complexe organo-minéral: très délicate à cause des échanges entre le complexe adsorbant et la solution du sol et de la dissolution de sels peu solubles ayant précipité lors de la préparation de l'échantillon,
 - . par le calcul: distribution des espèces en solution et coefficients de sélectivité des argiles.

Plusieurs paramètres sont utilisés:

- le taux de sodium adsorbé sur le complexe organo-minéral (SAR),
- le taux de saturation en sodium du complexe adsorbant (Na/T)
- le pourcentage de sodium échangeable (ESP).

LES METHODES DE MESURE DE LA SALINITE

La mesure de la salinité peut être:

- . ponctuelle (horizon) ou globale (profil de sol),
- . locale (station de mesure) ou spatialisée (parcelle, région),
- . instantanée (expertise) ou continue (évolution temporelle).

Les différentes méthodes sont:

* les méthodes électriques (capteur de salure, sonde quadripôle, conductivimètre électromagnétique):

méthodes directes sur le terrain et non perturbatrices, permettent le suivi temporel, nécessitent un calage sur une méthode de laboratoire, sensibles à l'humidité du sol.

* les méthodes sur extrait aqueux (à saturation ou dilué):

méthodes de laboratoire sur échantillons, peu adaptées au suivi en station.

* les méthodes d'extraction de la solution du sol (céramique poreuse, tensionic):

se rapprochent le plus des conditions du milieu, adaptées au suivi temporel, limitation par l'humidité du sol.

La méthode sur extrait aqueux saturé a été choisie comme méthode de référence.

LA SOLUTION DU SOL ET SA COMPOSITION CHIMIQUE

Intérêt pratique:

- . détermination du faciès chimique: différents modes de représentation graphique.
- . établissement de relations empiriques (composition chimique-CE, ESP-SAR, Na/T-SAR) qui ont une valeur régionale car fonction du faciès chimique des eaux.
- . utilisation en données initiales pour les modèles numériques de calcul de la distribution des espèces chimiques présentes en solution: calcul des ions libres et des paires d'ions.

Notion d'activité ionique:

L'analyse chimique d'une eau est exprimée en termes de concentrations totales des éléments en solution. Elle ne distingue pas les formes sous lesquelles se trouvent les espèces aqueuses. Celles-ci sont présentes sous forme d'ions simples ou libres et d'ions complexes (appelés aussi paires d'ions), qui sont une combinaison, chargée ou neutre, de plusieurs ions simples. Les différentes formes sont en équilibre entre elles dans la solution aqueuse.

Les unités de mesure de la concentration les plus courantes sont:

- . la mole par litre de solution (molarité),
- . la mole par kilo d'eau pure (molalité),
- . le milliéquivalent par litre de solution (= mmol L⁻¹ * valence de l'ion),
- . le gramme par litre de solution (= mol L⁻¹ * masse atomique).

La distribution des espèces aqueuses s'obtient par un calcul faisant intervenir les réactions d'équilibre entre espèces aqueuses et minéraux et entre espèces aqueuses elles-mêmes. Les résultats sont exprimés soit en terme de concentration (en mole L⁻¹), soit en terme d'activité, paramètre sans dimension, qui est liée à la concentration par un coefficient d'activité (en L mole⁻¹):

$$\text{activité ionique} = \text{coefficient d'activité} * \text{concentration ionique}$$

L'activité d'un ion ou d'une espèce aqueuse représente en fait sa concentration efficace ou sa concentration thermodynamique: c'est en terme d'activité que s'expriment les constantes d'équilibre des réactions chimiques.

Le coefficient d'activité ionique n'est pas constant, car il dépend de la composition chimique de la solution aqueuse. Il est égal à 1 pour une solution idéalement diluée (activité ionique = concentration ionique). Plus la solution est minéralisée, plus l'activité des ions devient limitée: le coefficient d'activité diminue.

La valeur des coefficients d'activité de chaque espèce est approchée à l'aide de lois empiriques (DEBYE-HÜCKEL, DAVIES...), qui sont établies en fonction de la force ionique de la solution et de paramètres soit dépendants de la température soit relatifs à la taille des ions hydratés. La force ionique d'une solution est définie par l'expression:

$$I = 1/2 \sum m_i z_i^2$$

où m_i est la concentration (en mol L⁻¹) de l'ion i et z_i sa charge (la somme est relative à toutes les espèces chargées présentes dans la solution).

Différents programmes informatiques permettent ce calcul dans des limites bien spécifiques

Quelques équations d'un sol en équilibre avec sa solution saline:

* pour deux cations différents (formule de GAPON):

$$\text{Na}_{\text{ad}}/\text{Ca}_{\text{ad}} = K * \text{Na}/(\text{Ca}/2)^{1/2}$$

* équation plus générale:

$$\text{Na}_{\text{ad}}/(\text{CEC}-\text{Na}_{\text{ad}}) = K * (\text{Na}/(\text{Ca} + \text{Mg}/2))^{1/2}$$

Le coefficient K varie entre 0.010 et 0.015 et la relation est valable pour CE < 25 dS/m.

* ces relations ont été récemment modifiées et exprimées en termes d'activité (RIEU, 1992): connaissant les coefficient de sélectivité des échanges Na^+ - Ca^{++} ou Mg^{++} et Ca^{++} - Mg^{++} (le potassium adsorbé étant en général peu réactif), elles permettent de calculer les teneurs en Na^+ , Ca^{++} ou Mg^{++} adsorbé du sol en équilibre avec la solution dont le SAR est connu.

POTENTIALITES

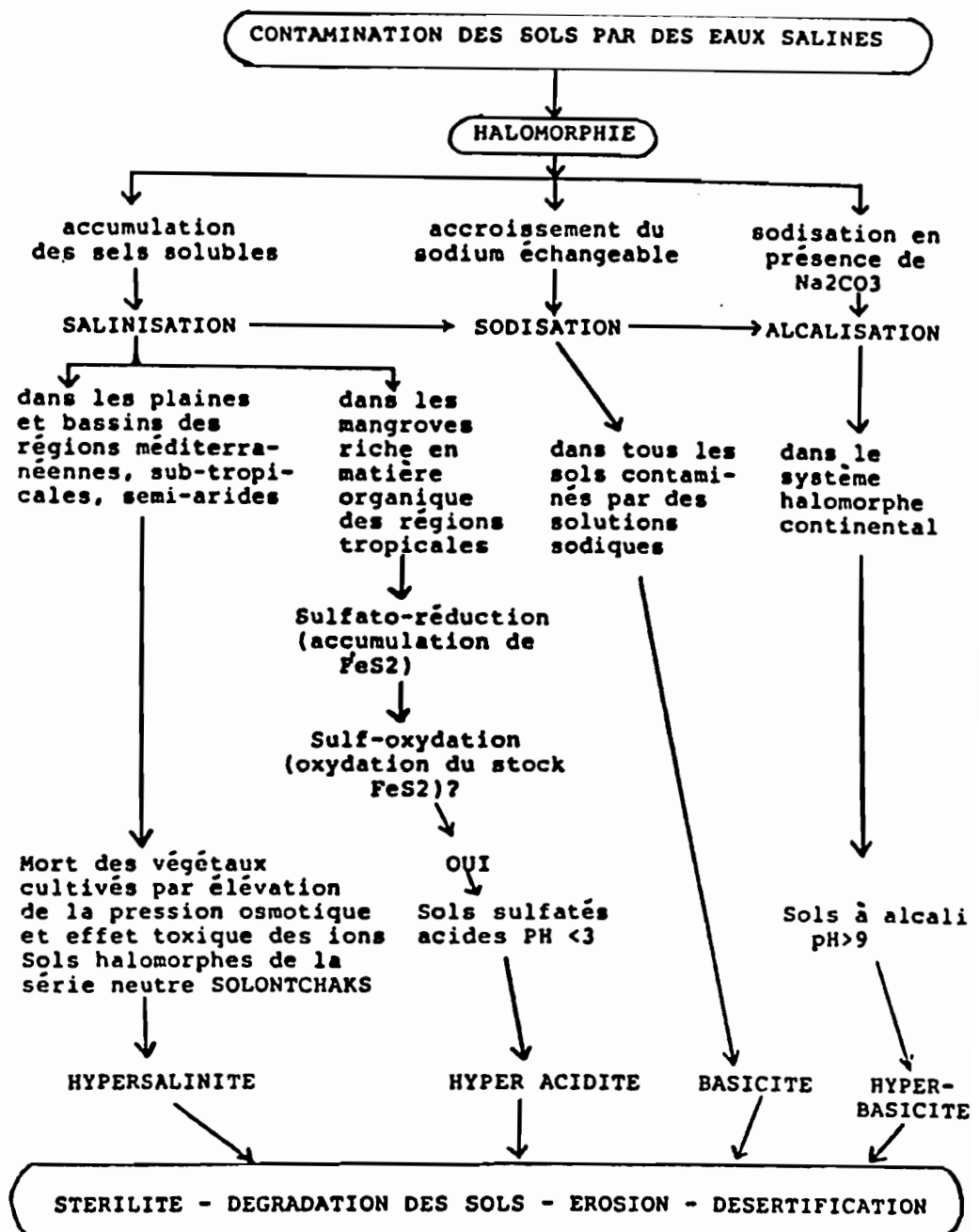
Elles dépendent:

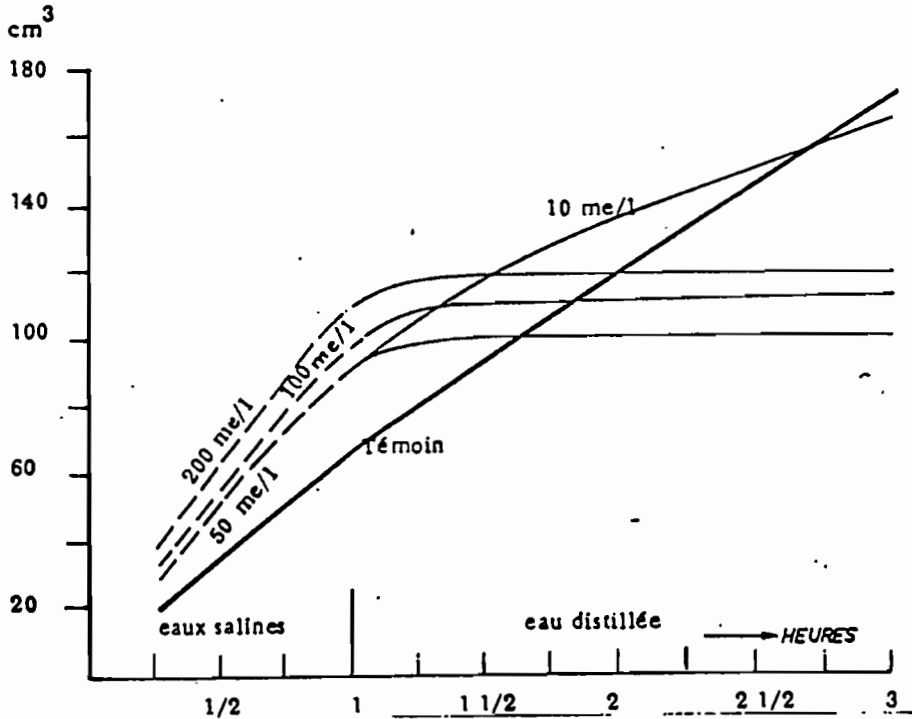
- . de l'intensité de la salinisation et/ou de l'alcalinisation,
- . de la disponibilité en eau pour lixivier les sels.

Les sols salins présentent de meilleures potentialités agricoles, mais nécessitent une surveillance constante lors de leur exploitation.

Des critères économiques sont à considérer pour aménager (réseaux d'irrigation et de drainage) et améliorer la fertilité.

Effets de la contamination des sols par des eaux salines
(SERVANT, 1985)





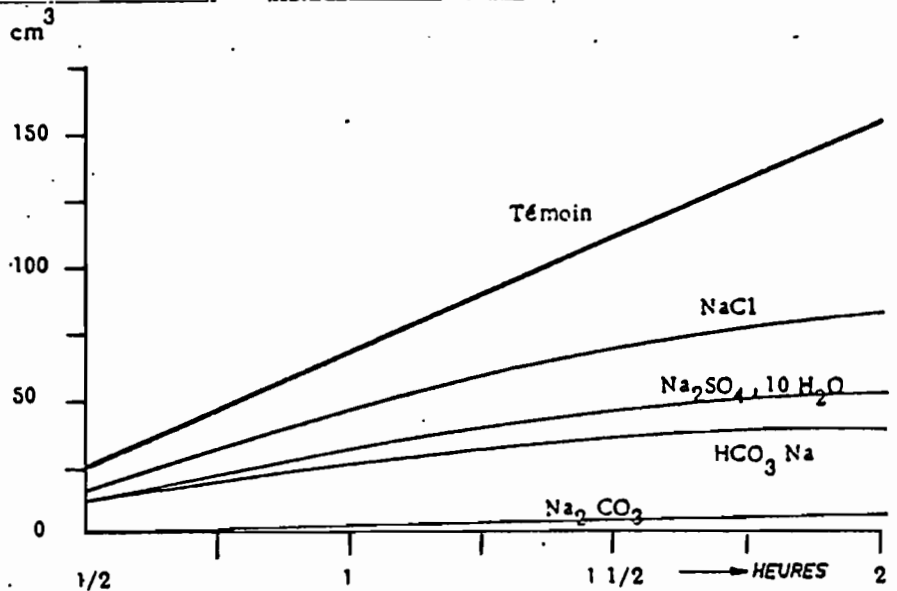
Influence des conditions salines sur la perméabilité des sols.

Percolation par des solutions de NaCl de différentes concentrations, suivie d'une percolation à l'eau distillée.

d'après J. SERVANT (1975).

Percolation par de l'eau distillée après imprégnation des échantillons par différentes solutions sodiques renfermant 200 me/l de sels.

d'après J. SERVANT (1975).



EQUIPEMENT DES STATIONS

Station ST 0

Stations ST 1, 2 et 3

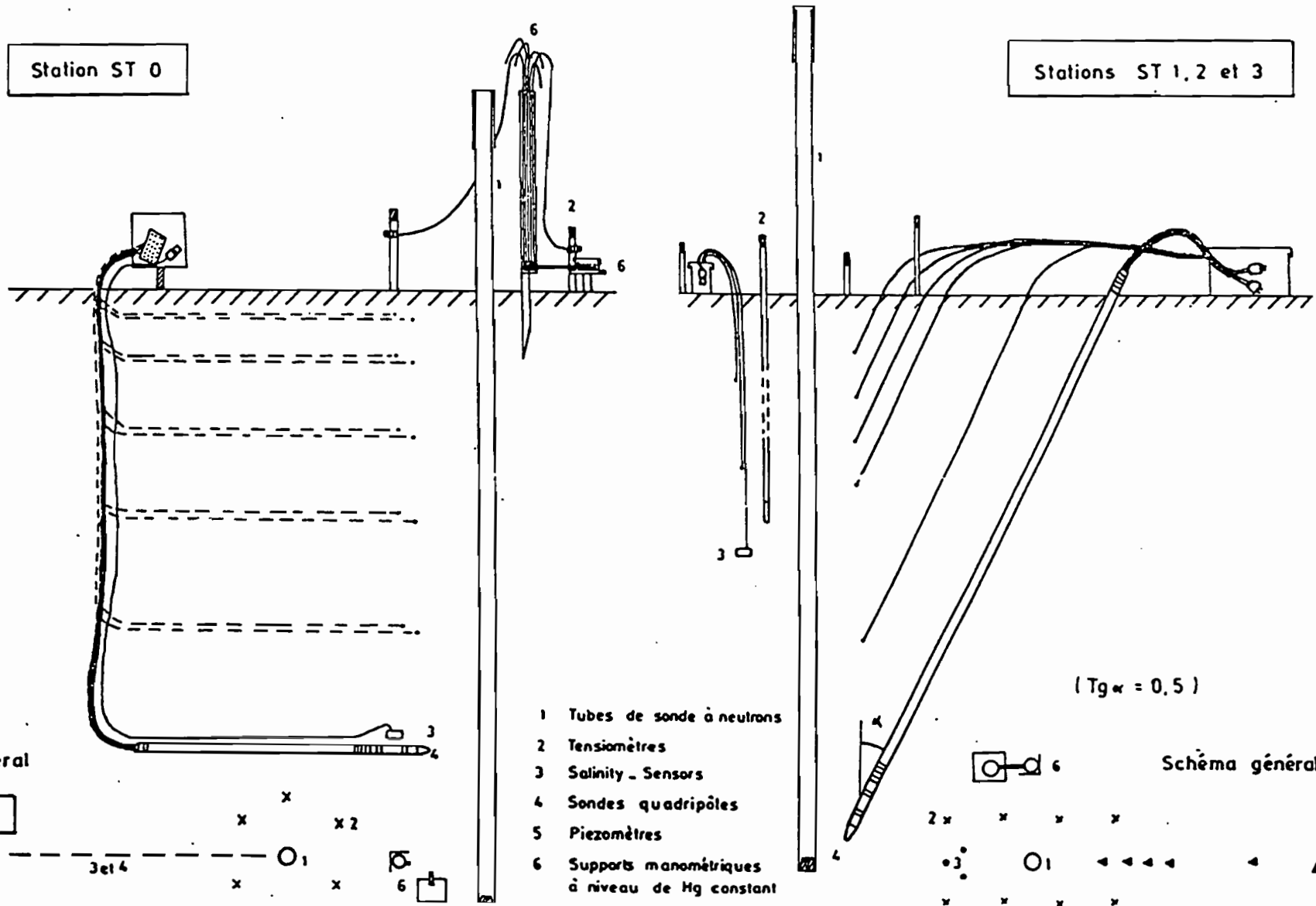
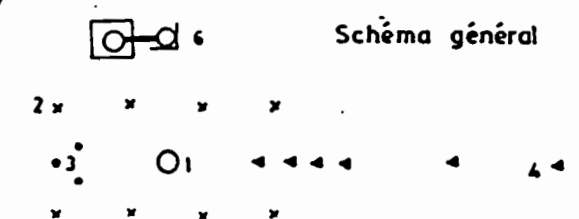
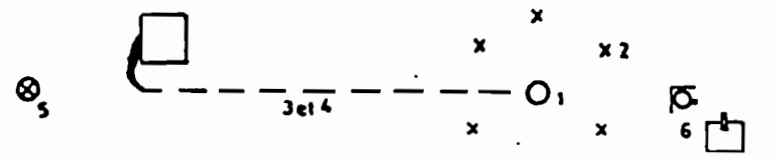


Schéma général

Schéma général

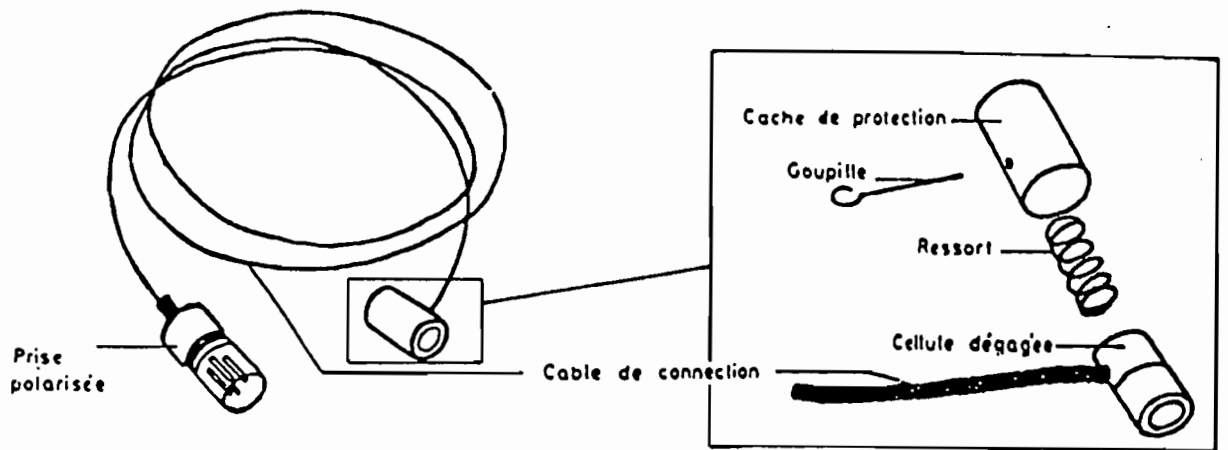
- 1 Tubes de sonde à neutrons
- 2 Tensiomètres
- 3 Salinity - Sensors
- 4 Sondes quadripôles
- 5 Piezomètres
- 6 Supports manométriques à niveau de Hg constant

($Tg = 0.5$)

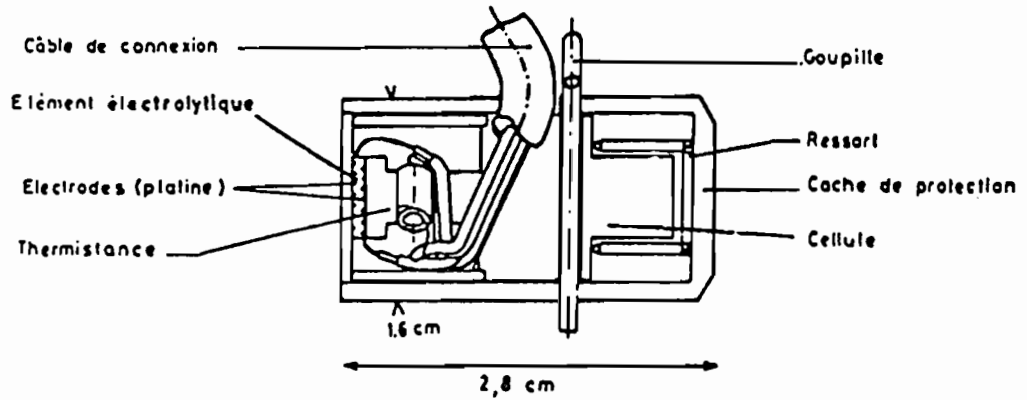


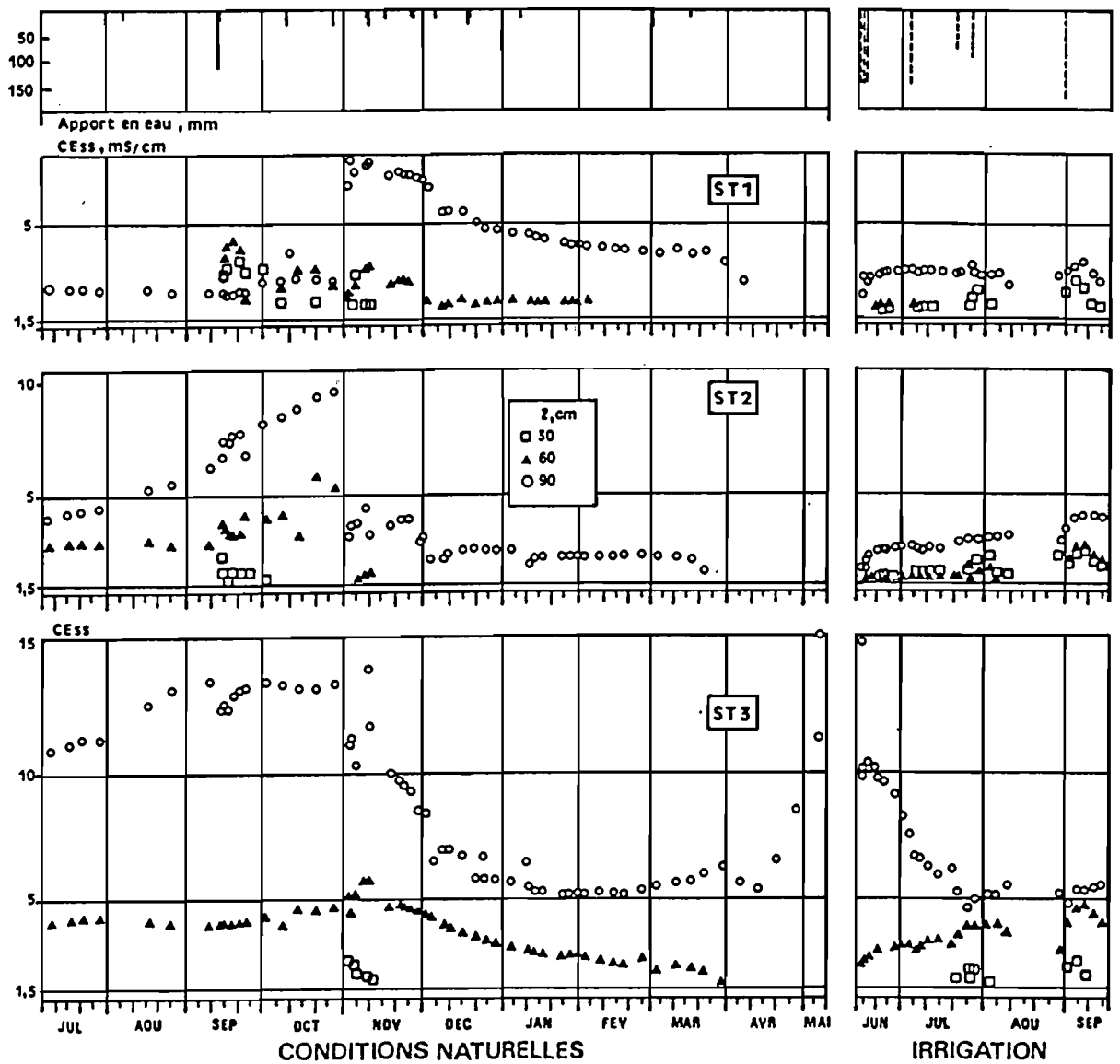
Capteurs électriques de salure

SALINITY_SENSOR (Type 500A de Soil Moisture Equip. Corp.,
extrait de la notice d'utilisation)

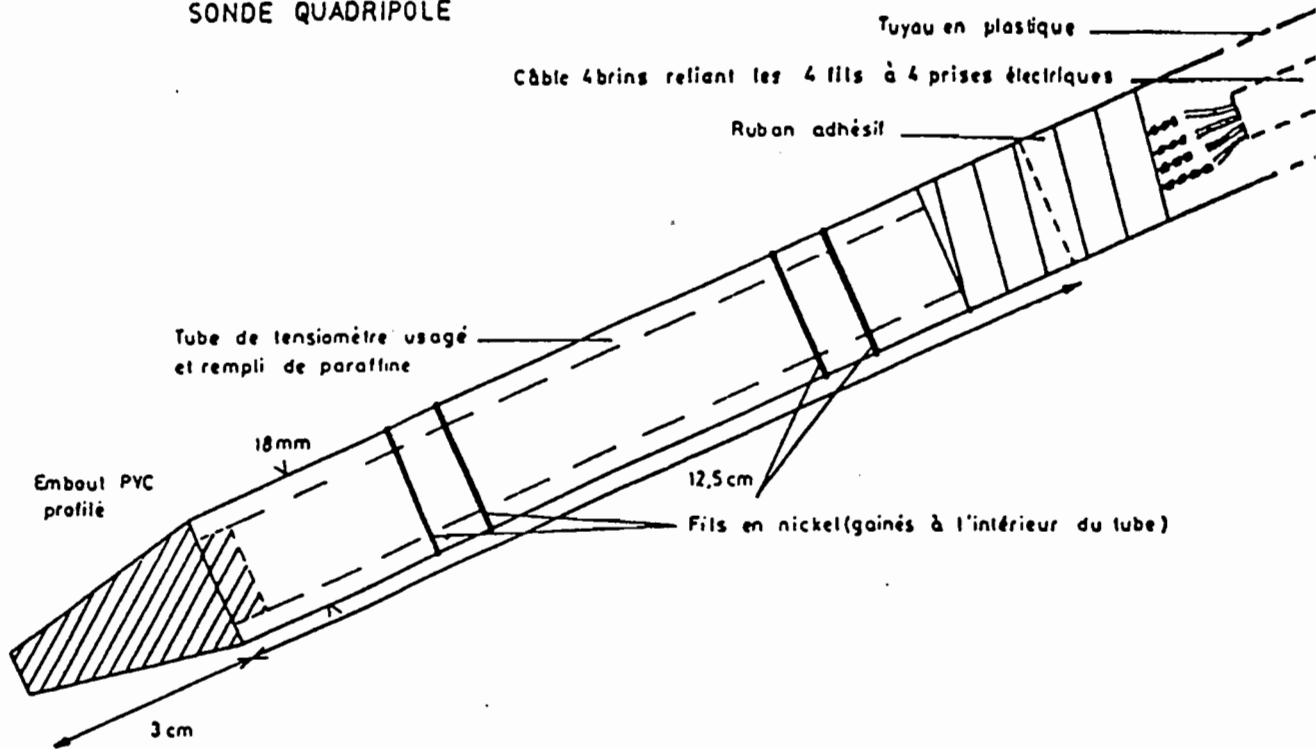


Cellule vue en coupe

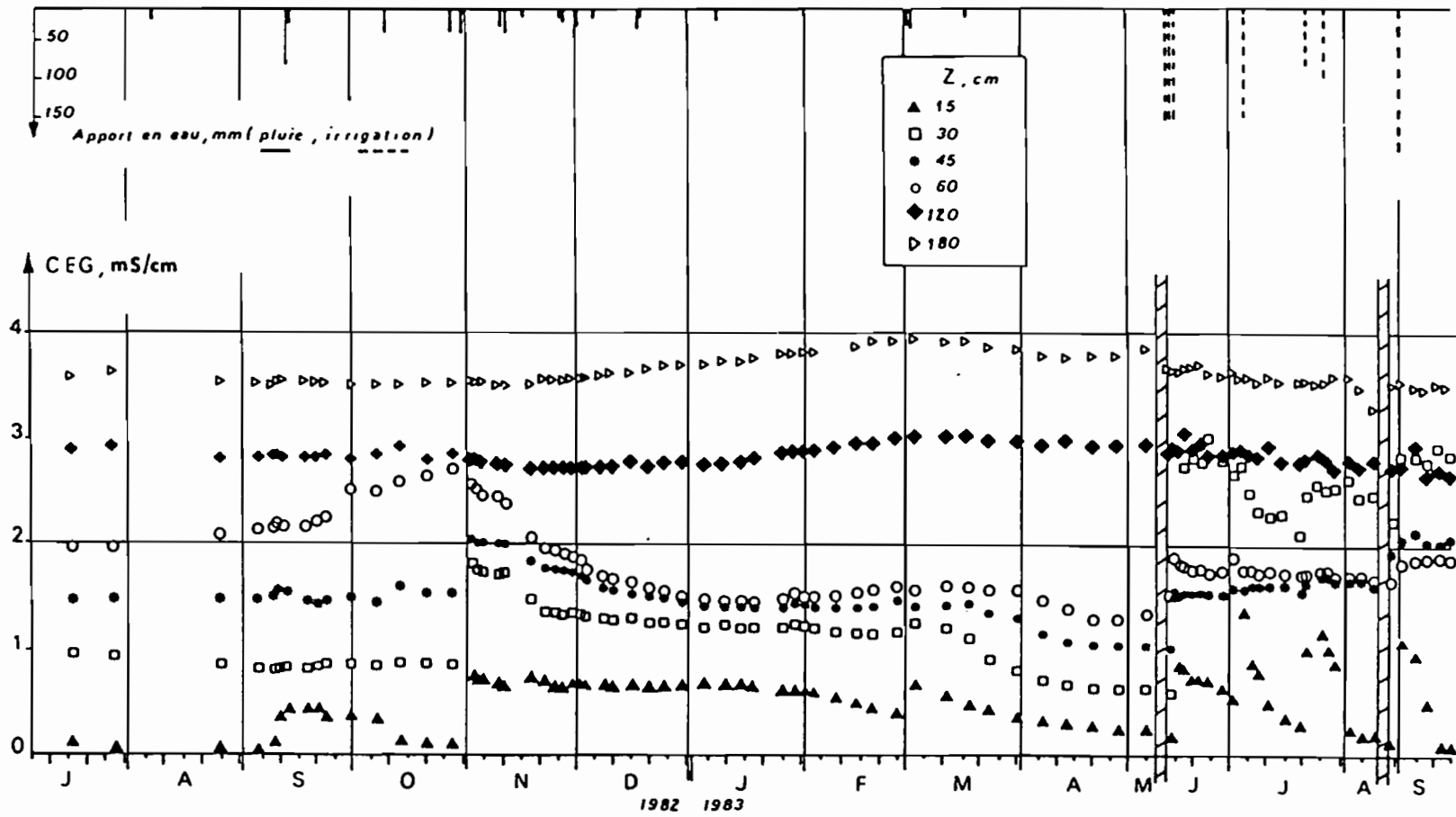




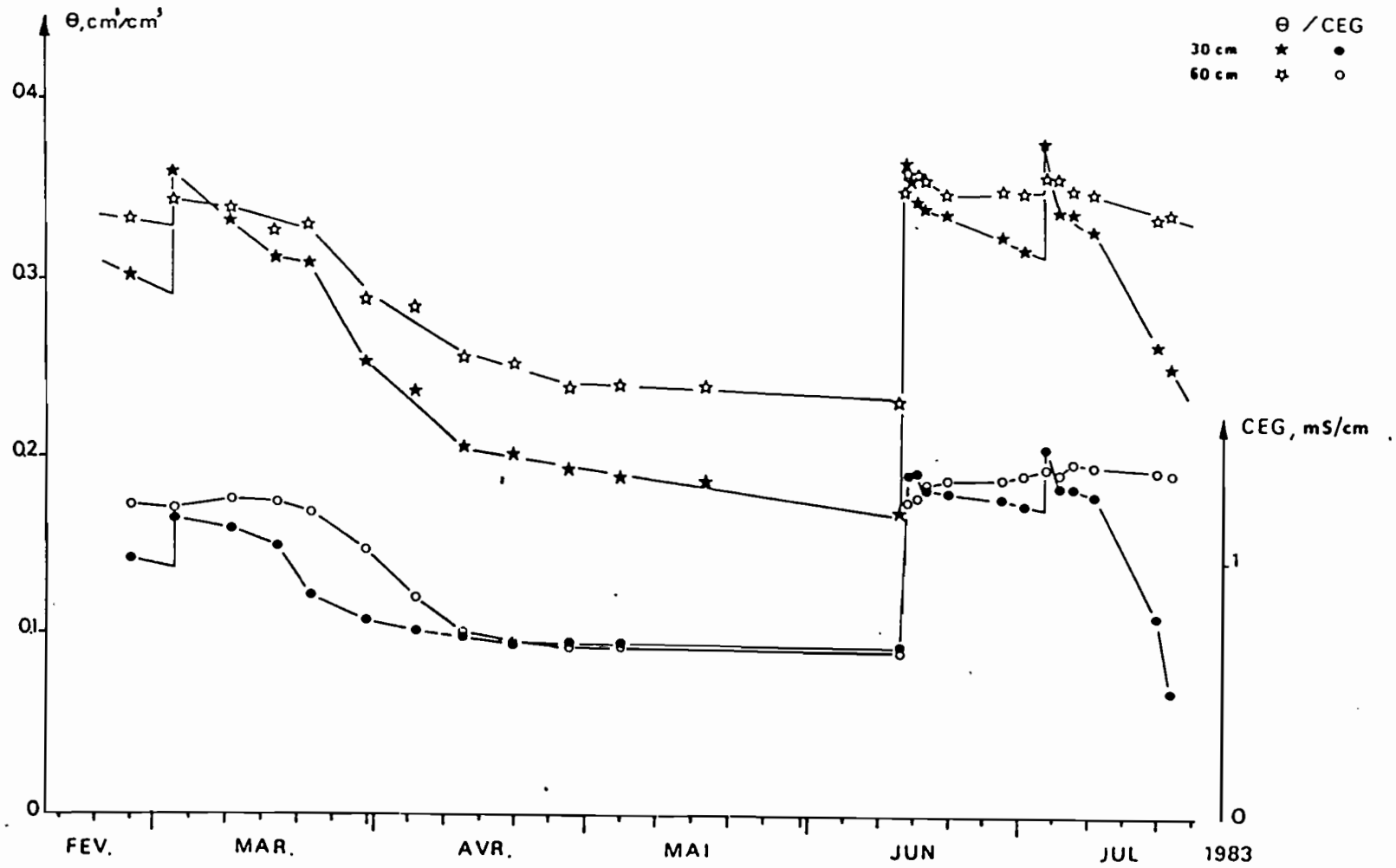
SONDE QUADRIPOLE

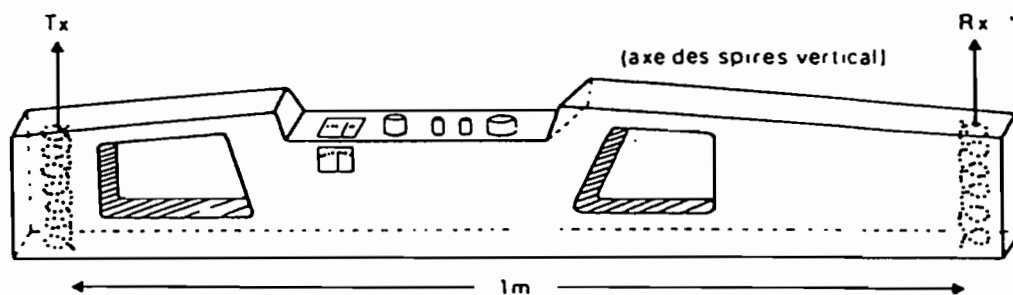


Station ST3

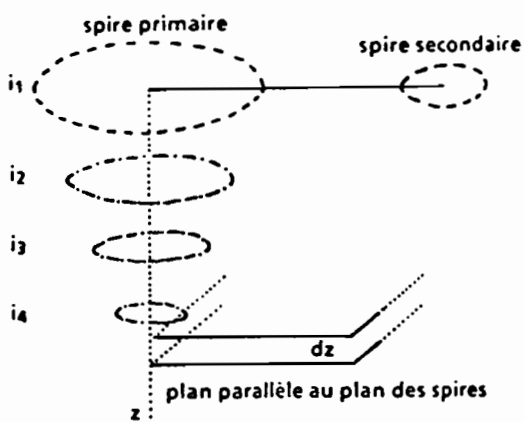


Comparaison humidité volumique / conductivité électrique globale - Station ST2

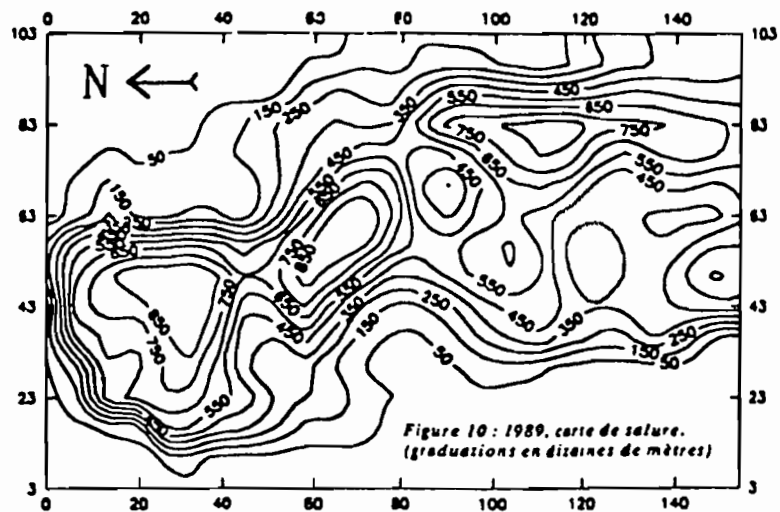
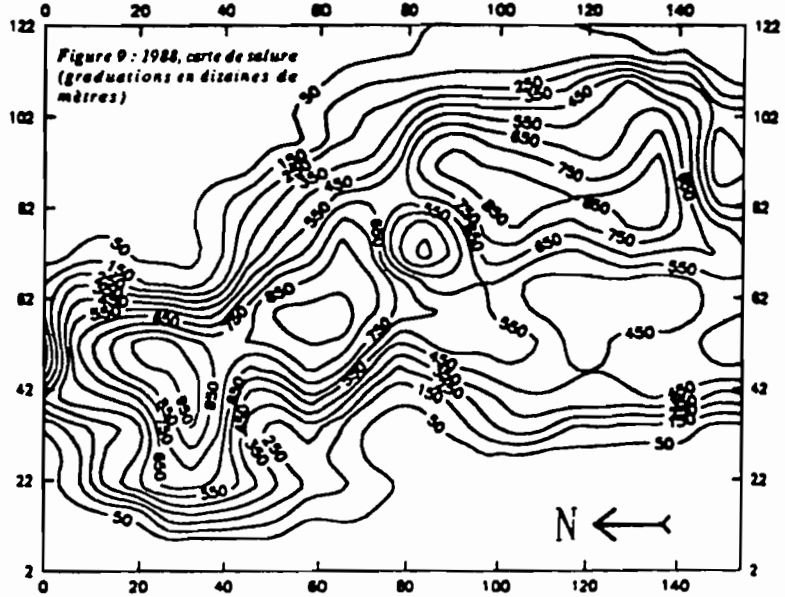
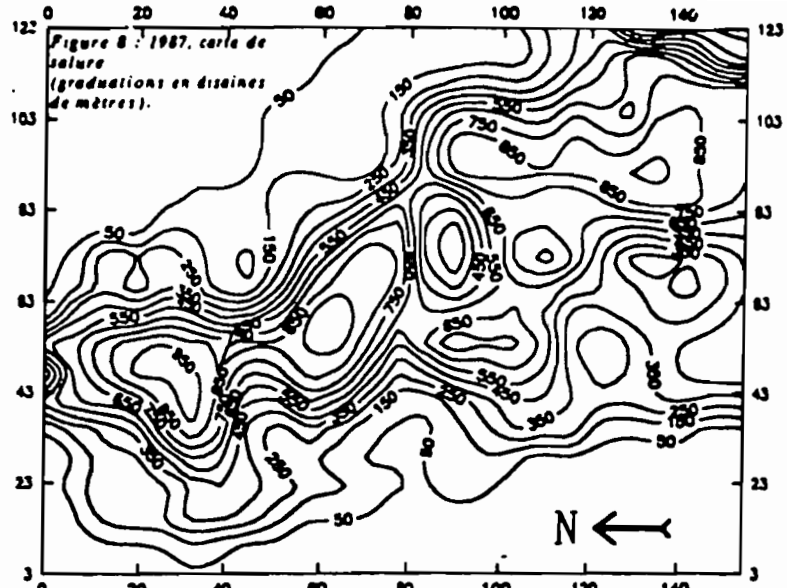


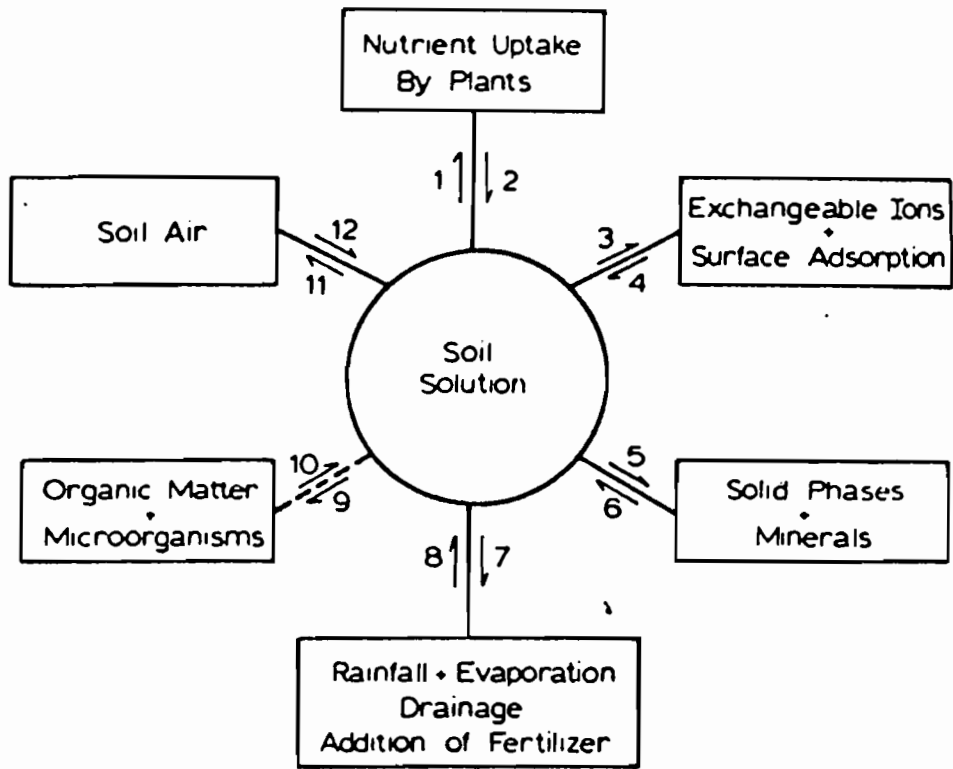


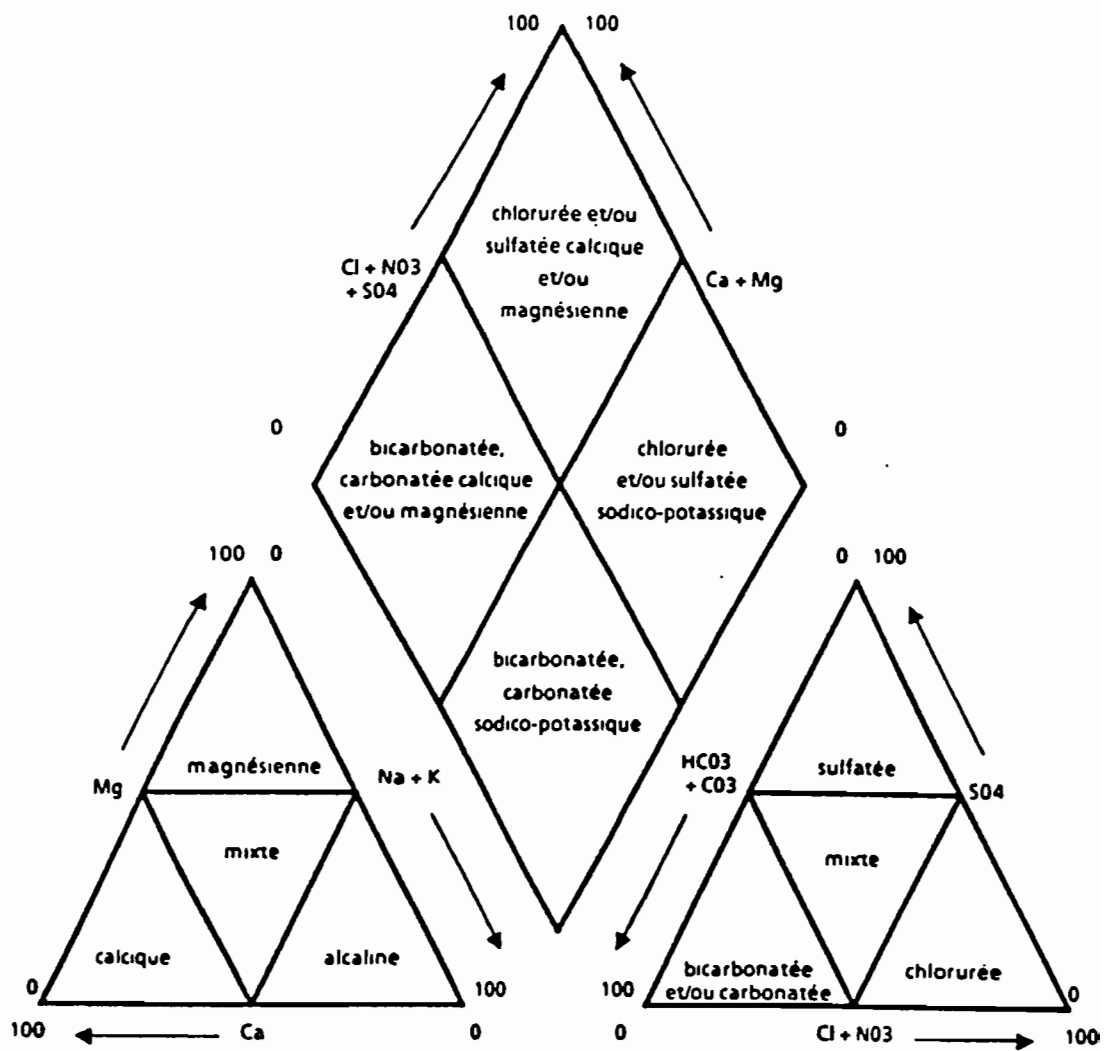
Appareillage de mesure de CEM (Geonics E-M38). Tx est la spire émettrice, Rx la spire receptrice. L'appareil est en position de mesure verticale CEV (c'est à dire l'axe des spires est vertical).



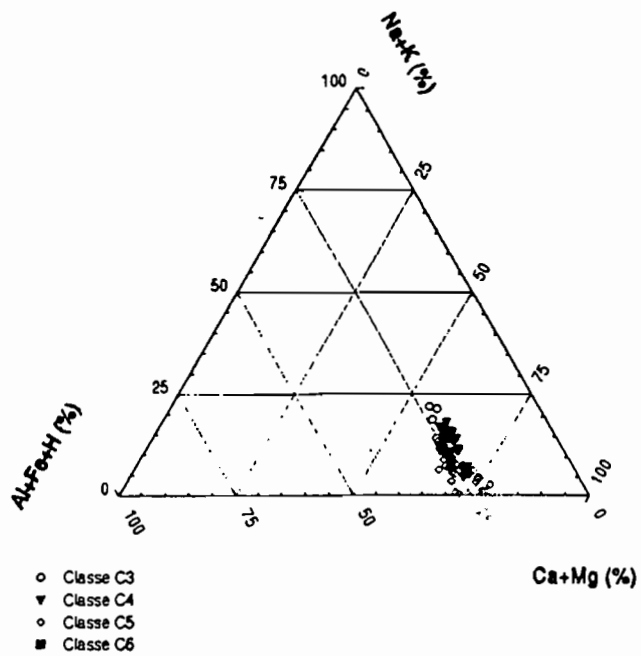
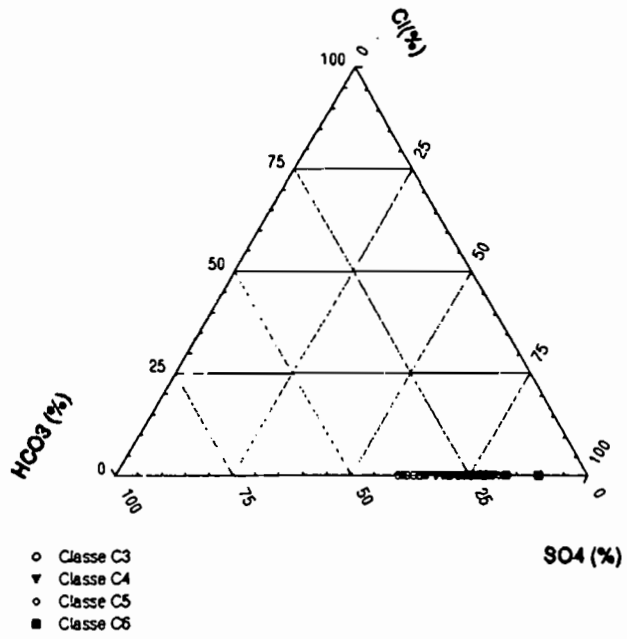
Principe de la mesure.

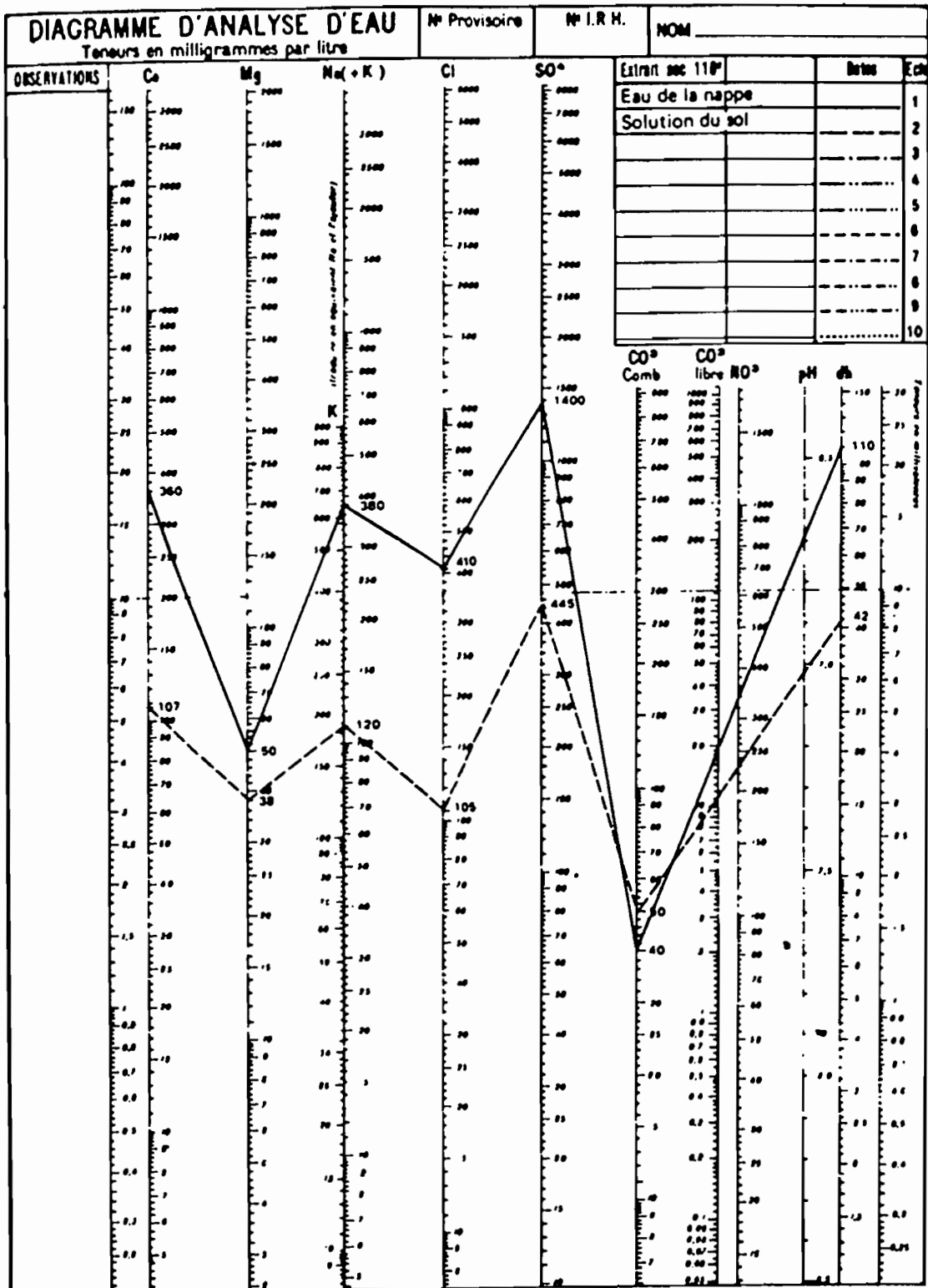




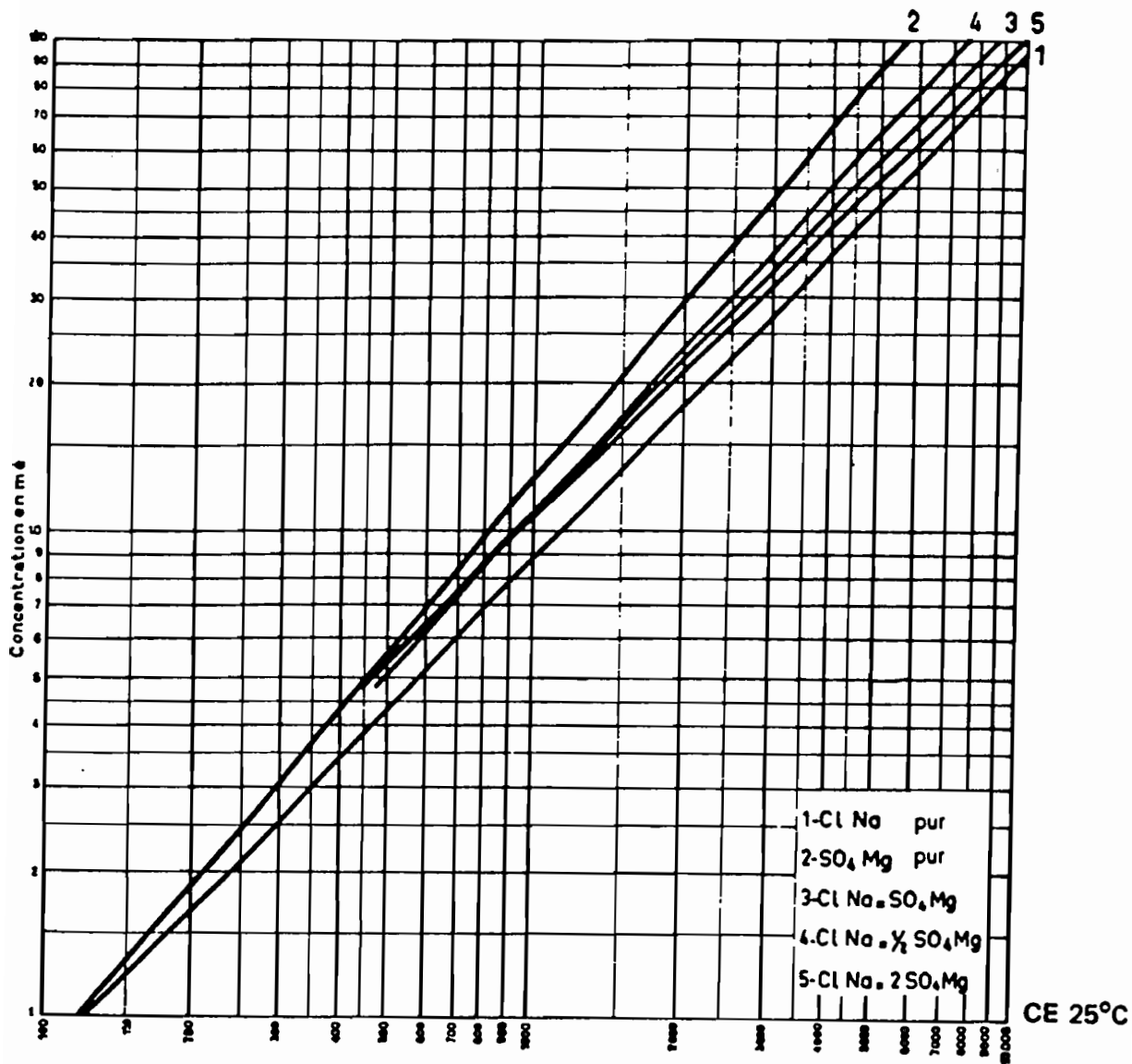


Les différentes classes d'eau des diagrammes de PIPER





Diagrammes logarithmiques de l'eau de la nappe et des sels solubles du profil n° 33.



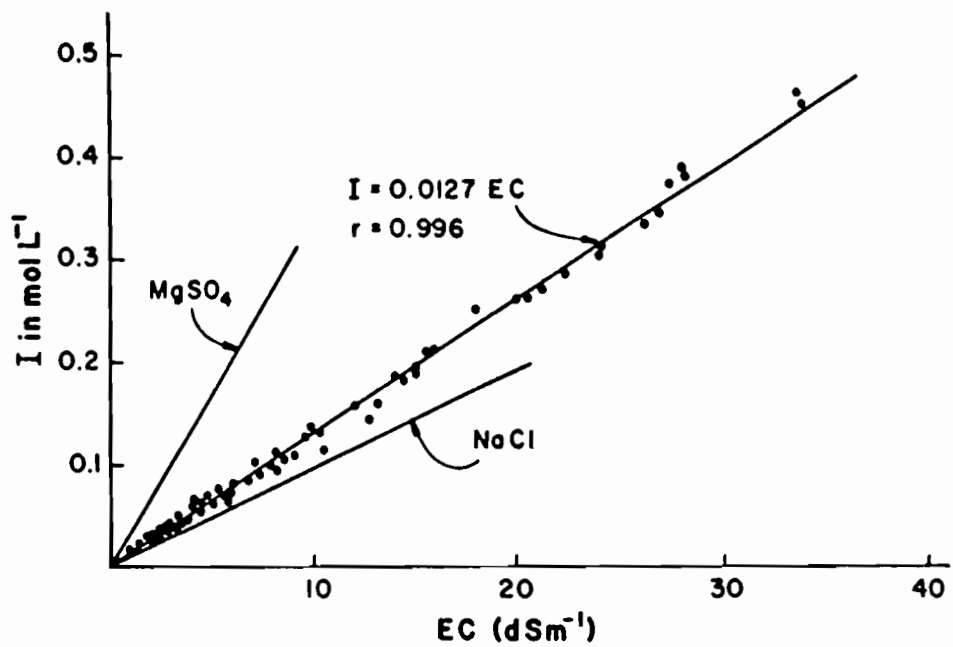
Abaque donnant la concentration de différents sels purs et en mélanges en fonction de la conductibilité à 25°C de leur solution.

Relations composition chimique - CE extraites de la littérature et leur domaine de validité

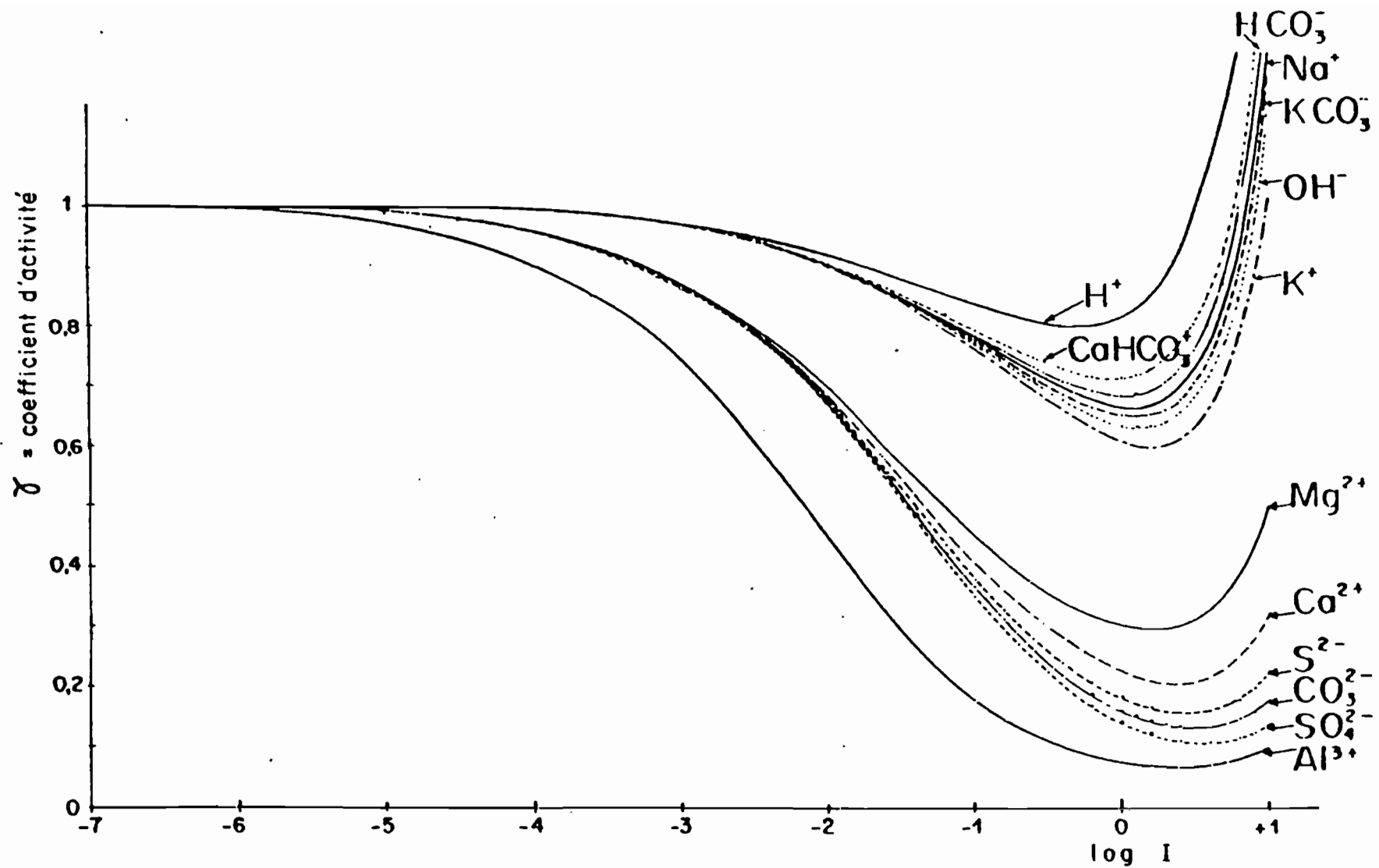
Relations	r ²	Correction paires ions	Origine des solutions	Nature	Domaine CE et I	Références
C = 10.37 CE ^{1.066}	-		Etats Unis	Ssol Inde	< 75 dS/m	CAMPBELL et al., 1948
C = 10 CE CD = 0.640 CE	- -		EU	Esf, Enp	< 4 dS/m	RICHARDS, 1954
I = 0.0000014 + 0.016 CE	0.814		Philippines	Ssol	< 4 dS/m < 0.07 mole/l	PONNAMPERUMA et al., 1966
CD = 0.625 CE ^{1.078} CD = 0.884 CE ^{0.993} CD = 0.592 CE ^{1.134}	- - -		Tunisie nord Tunisie sud Tunisie sud	Ssol Ssol Ssol	< 15 dS/m < 20 dS/m < 80 dS/m	CRUESI, 1970
C = -3.61 + 12.89 CE	0.985		EU	Ssol	< 10 dS/m	Mc NEAL et al., 1970
I = 0.0188 CE	-	oui	EU	Enp	< 1 dS/m	LANGMUIR, 1971
C = 10.11 CE CD = 727 CE	- -		EU	Esf	< 2.5 dS/m	TANJI, BIGGAR, 1972
C = 10.28 CE CD = 780 CE	- -			Ssol	< 15 dS/m	
I = 0.0003 + 0.0127 CE	0.992	oui	EU	Ssol Esf	< 35 dS/m < 0.5 mole/l	GRIFFIN, JURINAK, 1973
C = 9.76 CE ^{1.055}	0.993		EU	Ssol Esf, Susp.	< 15 dS/m	MARION, BABCOCK, 1976
C = 9.016 CE ^{1.038}	0.997	oui	EU	Ssol Esf, Susp.	< 15 dS/m	
I = 0.0144 CE ^{1.008}	0.994	oui	EU	Ssol Esf, Susp.	< 15 dS/m < 0.3 mole/l	
I = 0.0117 CE ^{1.083}			Tchad	Esf	< 27 dS/m < 0.4 mole/l	GAC, 1980
CD = 0.591 CE ^{1.128} I = 0.011 CE ^{1.185}	0.984 0.953		Tunisie Tunisie	Enp Enp	< 15 dS/m < 15 dS/m < 0.2 mole/l	BAHRI, 1982
C = 8.9 CE ^{1.075}	0.941		Sénégal	Ssol	< 120 dS/m	LE BRUSQ, LOYER, 1982
C = 8.51 CE ^{1.116} I = 0.0105 CE ^{1.058}	0.998		Sénégal Sénégal	Esfévap Esfévap	< 45 dS/m < 45 dS/m < 0.6 mole/l	CARN, 1985
CD = 0.640 CE ^{0.858} CD = 0.684 CE ^{0.918}	0.953 0.960		Brésil	Esf Esf	< 5 dS/m < 20 dS/m	LARAQUE, 1991
C = 9.95 CE ^{1.002} CD = 0.98 CE ^{0.945}	0.998 0.996		Mexique	Enp Enp	< 180 dS/m < 20 dS/m	GONZALES-BARRIOS, 1992

C représente la concentration ionique totale ($C = 1/2Sm_i$): m_i (concentration de l'ion i) et C sont exprimés en $mmol L^{-1}$,
CD la charge minérale dissoute totale ($CD = Sm_i$): m_i (concentration de l'espèce chargée ou neutre i) et CD sont exprimés en $g L^{-1}$,
I la force ionique ($I = 1/2Sm_i z_i^2$): m_i (concentration de l'ion i de valence z_i) et C sont exprimés en $mol L^{-1}$,

Ssol = solution du sol; Esf = eau de surface; Enp = eau de nappe; Susp = eau chargée de suspensions



Relationship between ionic strength and electrical conductivity where the solution composition is corrected for ion complexation



Valeurs des coefficients d'activité de certains ions en fonction de la force ionique de la solution

(Extrait de Droubi A., 1976)

Solution GI90. Données initiales brutes avant calcul
d'équilibre préalable à la dilution.

- INITIAL DATA -

PCO2 (atm) 3.162E-04
181.00

ACTUAL VOLUME OF SOLUTION (cm3) :

Concentrations (mol/L) :

K t 3.090E-03
Na t 2.355E-01
Ca t 1.087E-02
Mg t 2.375E-02
Cl t 2.303E-01
SO4 t 2.688E-02
CaCO3 c 0.000E+00
CaSO4 c 0.000E+00

Exchangeable cations (meq/100g):

Ex. Na 1.617E+01
Ex. Ca 3.900E+00
Ex. Mg 7.470E+00

++ Masse of soil (g): 200.000

++ Global variation of volume of solution: 181 cm3 ----> 1000 cm3

++ Actual index of concentration/dilution: 1.000

++ Mole fraction of Mg in the Mg-Calcite : 0.000

Solution GI90. Equilibre de l'extrait de pâte saturée avant dilution.

DISTRIBUTION OF SPECIES			SOLUTION CHARACTERISTICS	
	mol/L	Activity		
K	3.090E-03	2.265E-03	pH	8.486
Na	2.374E-01	1.741E-01	PCO2 (atm.)	3.162E-04
Ca	6.901E-04	1.993E-04	-log(PCO2)	3.500
CaHCO3	7.598E-06	5.570E-06	Ionic Strength (mol/L)	2.963E-01
Mg	1.057E-02	3.054E-03	Water Activity	9.902E-01
MgHCO3	4.965E-05	3.640E-05	log Water Activity	-4.280E-03
H	4.455E-09	3.266E-09	SAR tot. conc. (mol/L) ^{1/2}	6.288E+01
OH	4.177E-06	3.062E-06	SAR free ion conc.	7.075E+01
Cl	2.173E-01	1.593E-01	SAR free ion activ.	9.651E+01
SO4	2.181E-02	6.298E-03	Kps Calcite	4.266E-09
CO3	7.616E-05	2.199E-05	Q (Ca).(CO3)	4.384E-09
HCO3	2.047E-03	1.501E-03	Kps Gypsum	1.410E-05
H2CO3	1.336E-05	1.096E-05	Q (Ca).(SO4)	1.255E-06
CaCO3	8.469E-07	6.947E-07	Alcalinity (molc./L)	2.660E-03
CaSO4	3.124E-04	2.563E-04	Resid. Alc. Cal. (molc./L)	6.379E-04
MgCO3	2.057E-04	1.688E-04	Charge Balance (molc./L)	-1.418E-05
MgSO4	4.171E-03	3.422E-03	EC (G.J.) (dS/m)	23.352
NaCl	1.299E-02	9.181E-03	EC (M.B.) (dS/m)	19.998
Na2SO4	5.843E-04	4.794E-04	Osmotic Pot. (cm H2O)	-1.383E+04

DISTRIBUTION OF MATTER IN THE ACTUAL SYSTEM

Solut. or Prec. (mol/L)	Adsorbed (meq/100g)	Mass of matter (g)
K		2.187E-02
Na	14.710	1.724E+00
Ca	3.890	1.633E-01
Mg	8.939	2.832E-01
Cl		1.480E+00
SO4		4.670E-01
Ca, MgCO3c		1.894E-01
CaSO4c		0.000E+00
Total Adsorbed	27.540	1.050E+00
Total (K+Na+Ca+Mg+Cl+SO4) solut. + prec. + ads.		4.214E+00
Total (H2CO3+HCO3+CO3) solut. + prec.		1.411E-01
Total Soil		2.000E+02
Total Water		1.810E+02
Mole fraction of Mg in Mg-Calcite :	0.06000	

Reference : GI90

Concentration index : 1.000

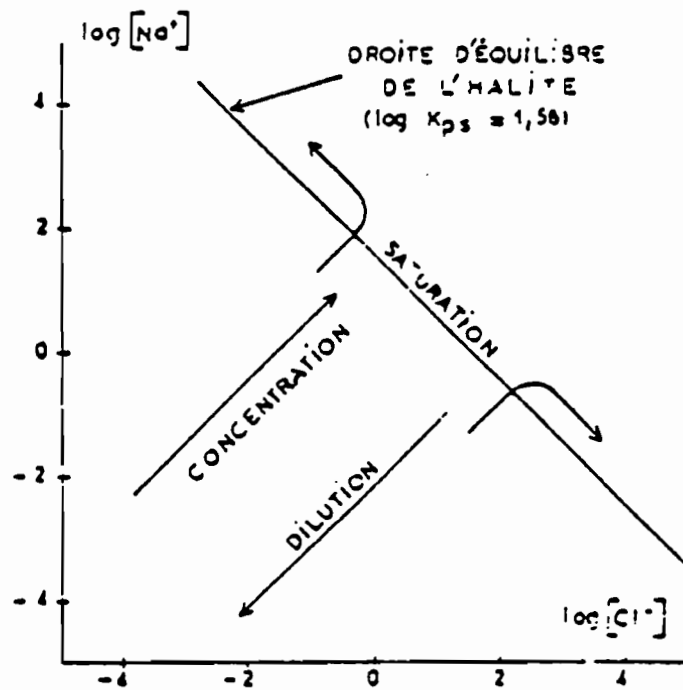
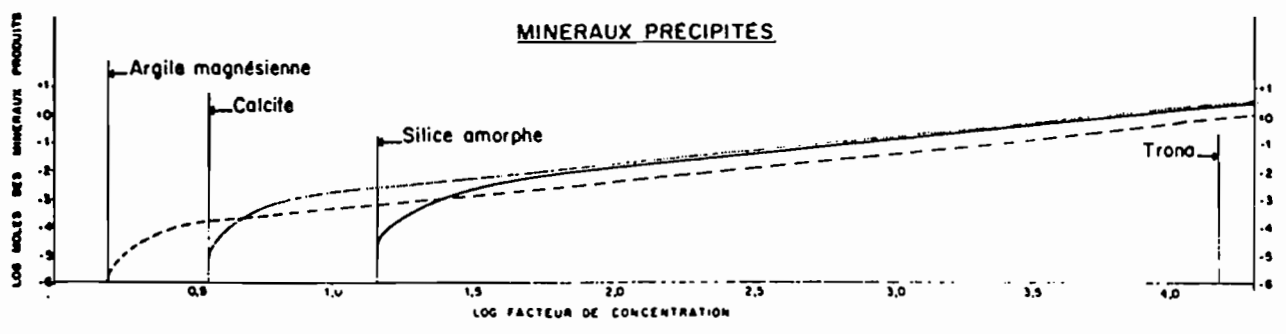
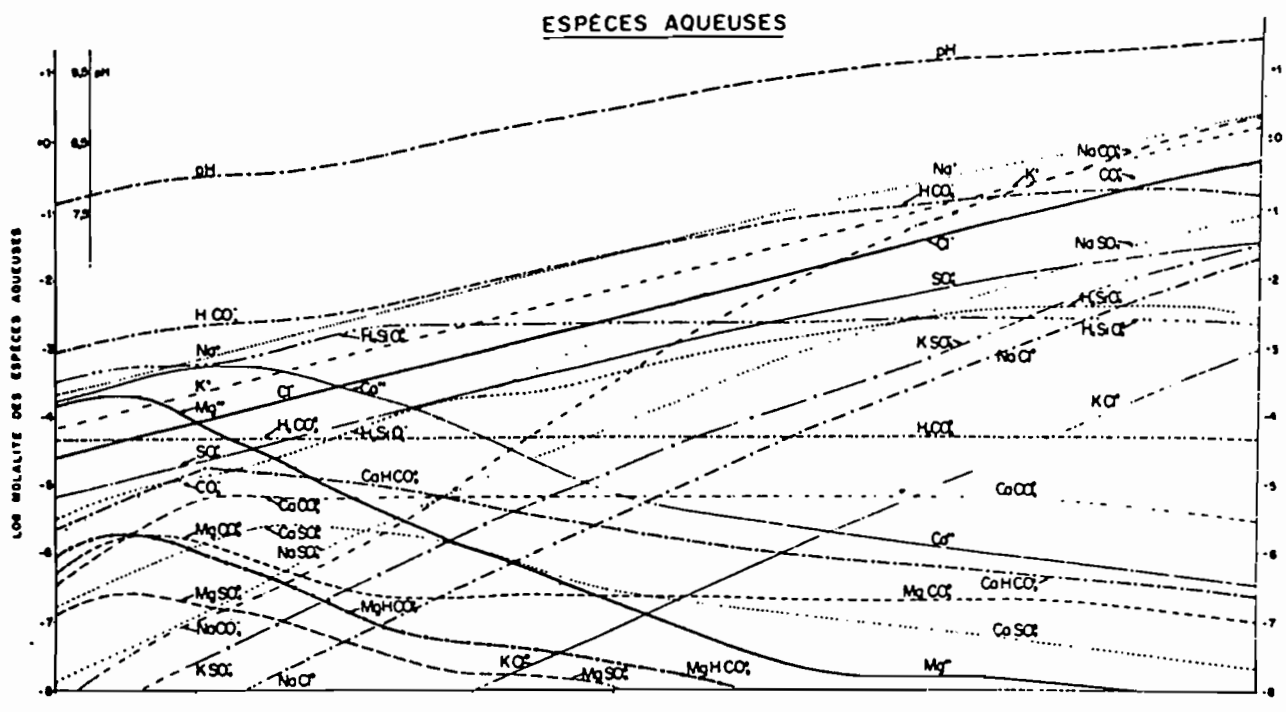
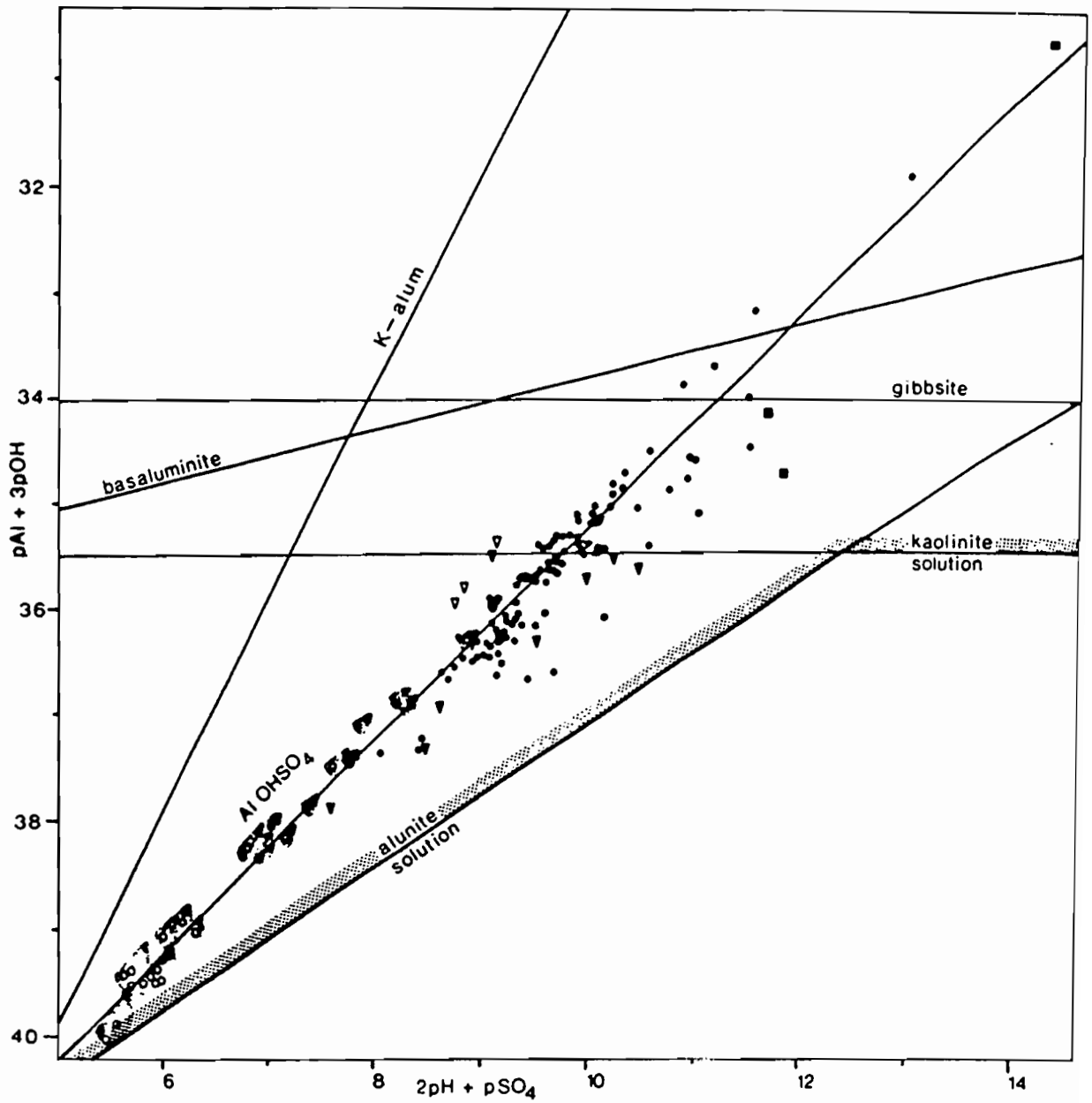


Schéma d'évolution des concentrations dans les domaines de sous-saturation ou de saturation par rapport à la halite (NaCl): Loi du "T".

(Extrait de Tardy et Gac, 1979)



Variation de la composition chimique de la solution et quantités de minéraux précipités au cours de l'évaporation.



Relations composition chimique - CE
des eaux de surface du barrage de Djilakoun

Concentrations totales (en mmol L ⁻¹)		Concentrations corrigées par les paires d'ions (en mmol L ⁻¹)	
Cl = 5.380 CE ^{1.166}	(r ² = 0.976)	Cl = 5.367 CE ^{1.168}	(r ² = 0.975)
SO ₄ = 1.439 CE ^{0.888}	(r ² = 0.929)	SO ₄ = 1.225 CE ^{0.770}	(r ² = 0.921)
Ca = 0.290 CE ^{1.025}	(r ² = 0.942)	Ca = 0.267 CE ^{0.992}	(r ² = 0.938)
Mg = 0.688 CE ^{1.130}	(r ² = 0.963)	Mg = 0.632 CE ^{1.101}	(r ² = 0.960)
Na = 4.681 CE ^{1.183}	(r ² = 0.980)	Na = 4.658 CE ^{1.180}	(r ² = 0.980)
K = 0.149 CE ^{1.037}	(r ² = 0.963)	K = 0.148 CE ^{1.030}	(r ² = 0.958)
Al = 0.354 CE ^{0.573}	(r ² = 0.560)	Al = 0.249 CE ^{0.583}	(r ² = 0.560)
C = 8.116 CE ^{1.108}	(r ² = 0.981)	C = 7.557 CE ^{1.108}	(r ² = 0.981)
I = 0.0115 CE ^{1.084}	(r ² = 0.979)	I = 0.0103 CE ^{1.083}	(r ² = 0.980)
CD = 0.474 CE ^{1.105}	(r ² = 0.981)	CD = 0.475 CE ^{1.104}	(r ² = 0.981)

C est exprimé en mmol_e L⁻¹, I en mol L⁻¹, CD en g L⁻¹ et CE en dS/m

UTILISATION ET MISE EN VALEUR

Une bonne utilisation agricole des sols salés nécessite:

* l'élimination des sels en excès (lessivage) et la suppression de la source de sodium (drainage)

d'autant plus aisée que: . le sol est perméable

. l'eau (pluie, irrigation) est abondante et de bonne qualité

L'amélioration est temporaire quand la nappe est à faible profondeur: le drainage doit être efficient pour prévenir les risques de *salinisation secondaire*

* l'utilisation de plantes résistantes à la salinité

* la reconstitution de la fertilité par amendements (argile riche en Ca échangeable)

* des pratiques culturales particulières: labour de défoncement, ratissage des sels en surface, planage des parcelles...

QUALITE DE L'EAU D'IRRIGATION

* La composition chimique renseigne sur le pouvoir alcalinisant d'une eau d'irrigation car son utilisation peut entraîner une baisse de la perméabilité du sol. Ce risque est évalué par le SAR. Lorsque le drainage est efficient et que l'eau d'irrigation est utilisée sur une longue période, les cations de la solution du sol, apportés par l'eau d'irrigation, sont en équilibre avec ceux du complexe adsorbant (régime hydrique permanent): le SAR de l'eau d'irrigation sera considéré comme étant celui de la solution du sol.

Le risque d'alcalinisation du sol (ESP ou Na/CEC) est relié par une formule empirique au pouvoir alcalinisant de l'eau d'irrigation (SAR):

$$ESP = Na/T (\%) = 100 / (1 + (1 / (0.01475 SAR - 0.0126)))$$

avec $SAR = Na / (Ca + Mg/2)^{1/2}$ (composition chimique de l'extrait saturé de sol, exprimée en meq/l), relation valable pour Na/CEC < 50% (RICHARDS, 1954).

* Classification des eaux d'irrigation selon la CE et le SAR (diagramme USSLS, modifié par DURAND, 1983).

Des directives peuvent être données pour l'utilisation des eaux d'irrigation (FAO, 1976).

* La prise en compte du comportement d'une eau au contact d'un sol (précipitation lors de sa mise à l'équilibre, formation d'ions complexes ou paires d'ions, chargées ou neutres) se traduit par une modification du faciès chimique de la solution du sol. Une eau carbonatée va produire plus de paires d'ions qu'une eau sulfatée ou chlorurée et une eau calcimagnésienne plus qu'une eau sodique. Le SAR est modifié car les concentrations en Ca et Mg ont diminué tandis que celle du Na n'a pas varié. Le SAR est donc sous-estimé quand on utilise les concentrations totales de l'eau d'irrigation.

* Des modèles numériques intégrant des informations sur le comportement chimique et hydrodynamique d'un sol salé permettent d'établir des prédictions, à plus ou moins long terme, sur l'évolution de la salure.

* L'irrigation peut se faire par:

- . submersion: méthode efficace,
- . à la raie: les billons facilitent l'accumulation des sels à leur sommet,
- . par aspersion: économique en eau, lessivage peu efficace, coûte cher en irrigation automatique,
- . avec des eaux salées (même avec de l'eau de mer sur des terrains bien drainants).

ELIMINATION DES SELS PAR PERCOLATION

Calcul de la fraction lessivante en régime permanent:

Les eaux d'irrigation vont modifier les caractéristiques physico-chimiques de la solution du sol. Celle-ci est prélevée par les plantes et influe sur la structure du sol.

Le volume d'irrigation (V_i) doit subvenir aux besoins en eau des plantes (volume évapotranspiré), compenser les pertes par percolation et celles liées au réseau de distribution.

Pour lessiver les sels, il importe d'ajouter au volume d'irrigation un volume d'eau (V_l) que l'on dénomme besoin de lessivage: rapporté au volume d'irrigation, on définit la fraction lessivante ($FL = V_l/V_i$). Pour des raisons économiques, cette dose de lessivage devra être minimisée.

L'équation simplifiée du bilan des sels vérifie l'équilibre suivant en régime permanent (pas de lessivage et de salinisation):

$$V_i * C_i = V_d * C_d$$

où V_i et V_d sont les volumes d'irrigation et de l'eau de drainée (en m^3), C_i et C_d les concentrations respectives (en g/l).

La fraction lessivante est liée au facteur de concentration de la solution qui est déterminé par rapport à un état de référence (eau d'irrigation par exemple): $FL = 1/FC$ avec $FC = \text{salinité eau de drainage} / \text{salinité eau d'irrigation} = C_d/C_i$.

En régime permanent, le SAR de l'eau de drainage est voisin de celui de la solution du sol à la base de la zone racinaire qui est maximum (SAR max).

En l'absence de sels précipités, le SAR max est relié au SAR de l'eau d'irrigation (SAR_i) et à la FL par la relation:

$$SAR_{max} = SAR_i * (1/FL)^{1/2}$$

Pour une valeur fixée du SAR_{max} à ne pas dépasser, on déduit la fraction lessivante:

$$FL = (SAR_i/SAR_{max})^2$$

La sous-estimation du SAR_i, lorsque le faciès chimique de la solution du sol change, entraîne une sous-estimation de la fraction lessivante FL: l'alcalinisation du sol peut être provoquée. La fraction lessivante FL est d'autant plus faible que le SAR est élevé.

PLANTES HALOTOLERANTES

Des tables de tolérance ont été établies pour les cultures en prenant en compte soit la CE de l'eau d'irrigation, soit la CE de l'extrait saturé de sol (FAO, 1976). Elles ont une valeur indicatrice et doivent être adaptées aux conditions locales.

La sélection génétique de variétés résistantes à la salinité donne de bons résultats, mais se heurte souvent à des problèmes de diffusion auprès des agriculteurs.

AMENDEMENTS

Le type d'amendement et la quantité dépendent des caractéristiques du sol, du taux de remplacement du sodium souhaité et de considérations économiques.

Les amendements chimiques appliqués aux sols alcalins sont de trois types:

- . sels de Ca solubles (CaCl_2 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ gypse),
- . composés acides (acide sulfurique, sulfate de fer, sulfate d'aluminium, sulfure de calcium),
- . sels de Ca de faible solubilité (CaCO_3 , résidus de sucreries).

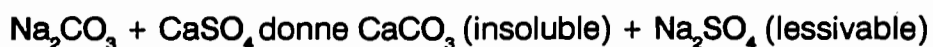
Plusieurs facteurs limitent leur emploi dans le sol: le pourcentage en carbonates alcalino-terreux (Ca et Mg) et le pH. Les réactions chimiques seront variables s'il y a présence ou non de carbonates alcalino-terreux et si le pH est alcalin ou acide.

Le gypse est un excellent amendement si le sol contient des carbonates alcalins.

Les sulfures ou l'acide sulfurique seront appliqués dans le cas contraire.

Les amendements calcaires seront utilisés en milieu acide.

Action du gypse:



Les sels CaCO_3 et Na_2SO_4 sont neutres et faiblement dissociés donc faibles producteurs d'ions OH^- .

Le complexe argilo-humique se recharge en Ca tandis que le pH diminue:



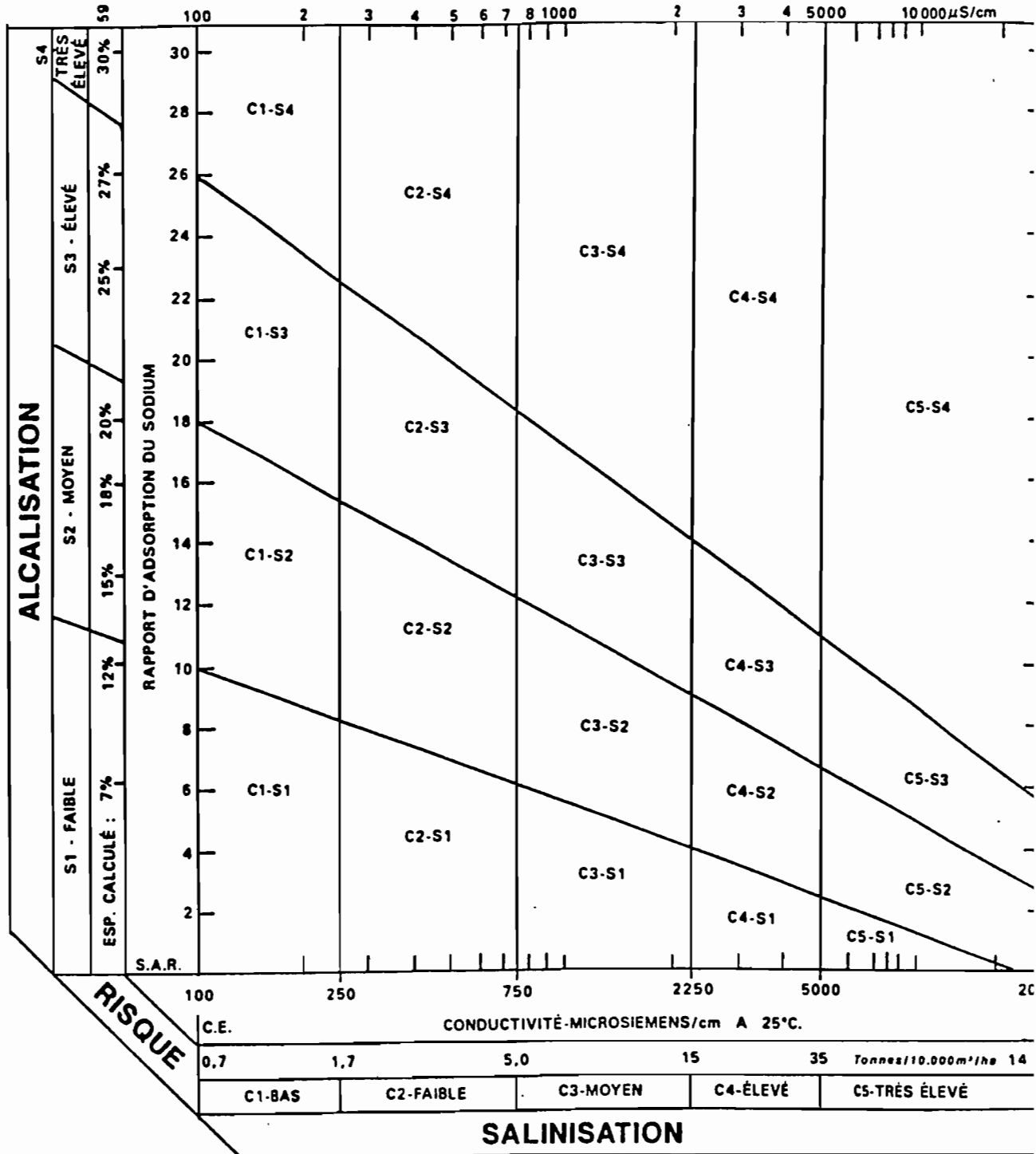
L'association avec de la matière organique accroît l'efficacité des amendements chimiques et restaure l'état physique des sols alcalins (structure, perméabilité).

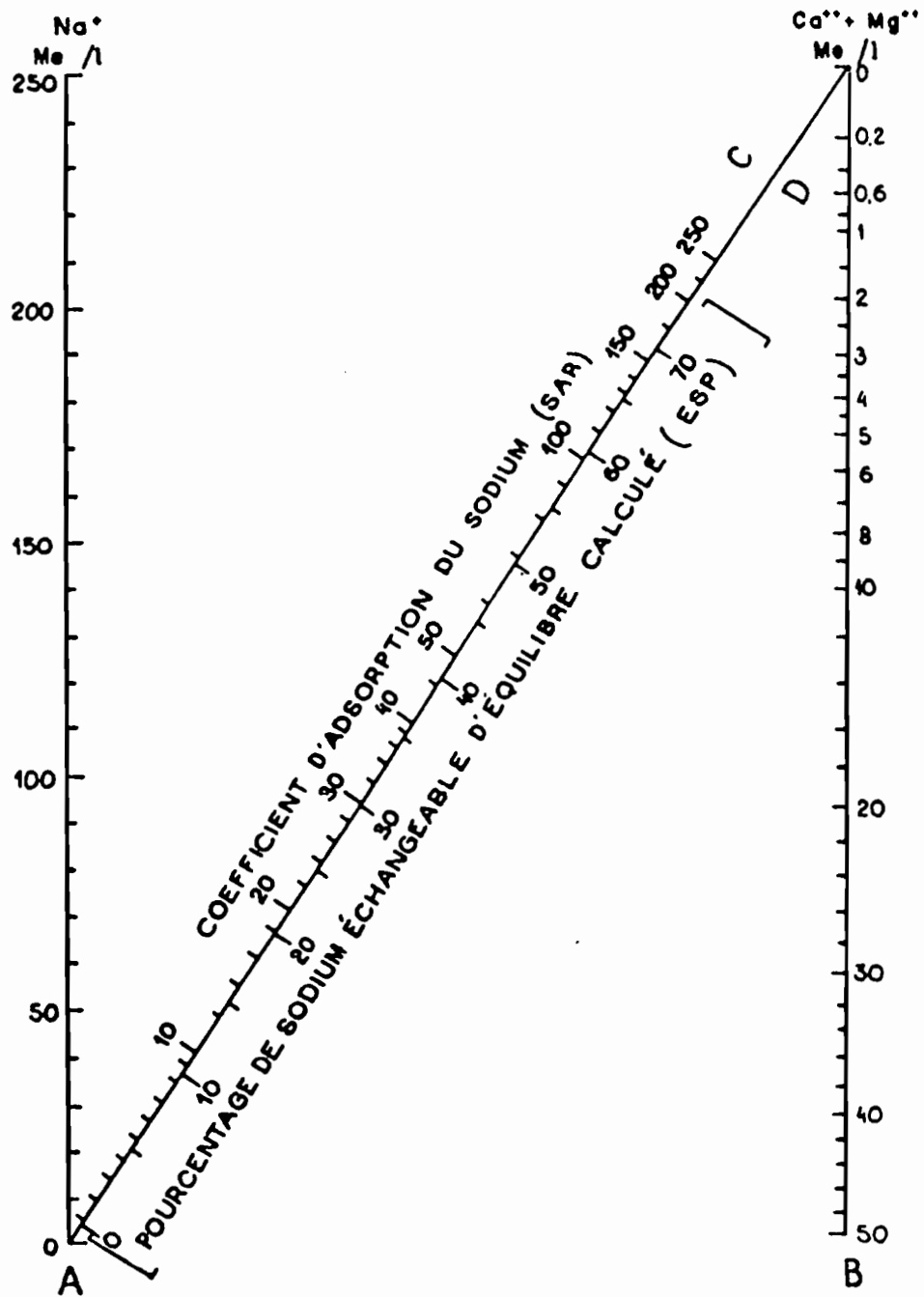
UN EXEMPLE DE MISE EN VALEUR DE TERRES SALEES

Les sols sulfatés acides salés de basse Casamance (Sénégal)

CLASSIFICATION DES EAUX D'IRRIGATION

(tableau de l'USSL - RIVERSIDE - J.H.DURAND, modifié)





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

DIRECTIVES POUR L'INTERPRETATION DE LA QUALITE D'UNE EAU D'IRRIGATION

	Pas de problème	Problème croissant	Problème grave
EC _{iw} (mmhos/cm)	< 0,7	0,7 à 3,0	> 3,0
SAR	< 3	3 à 9	> 9
Cl ⁻ en meq/l	< 4	4 à 10	> 10
Bore en mg/l	< 0,7	0,7 à 3,0	> 3,0

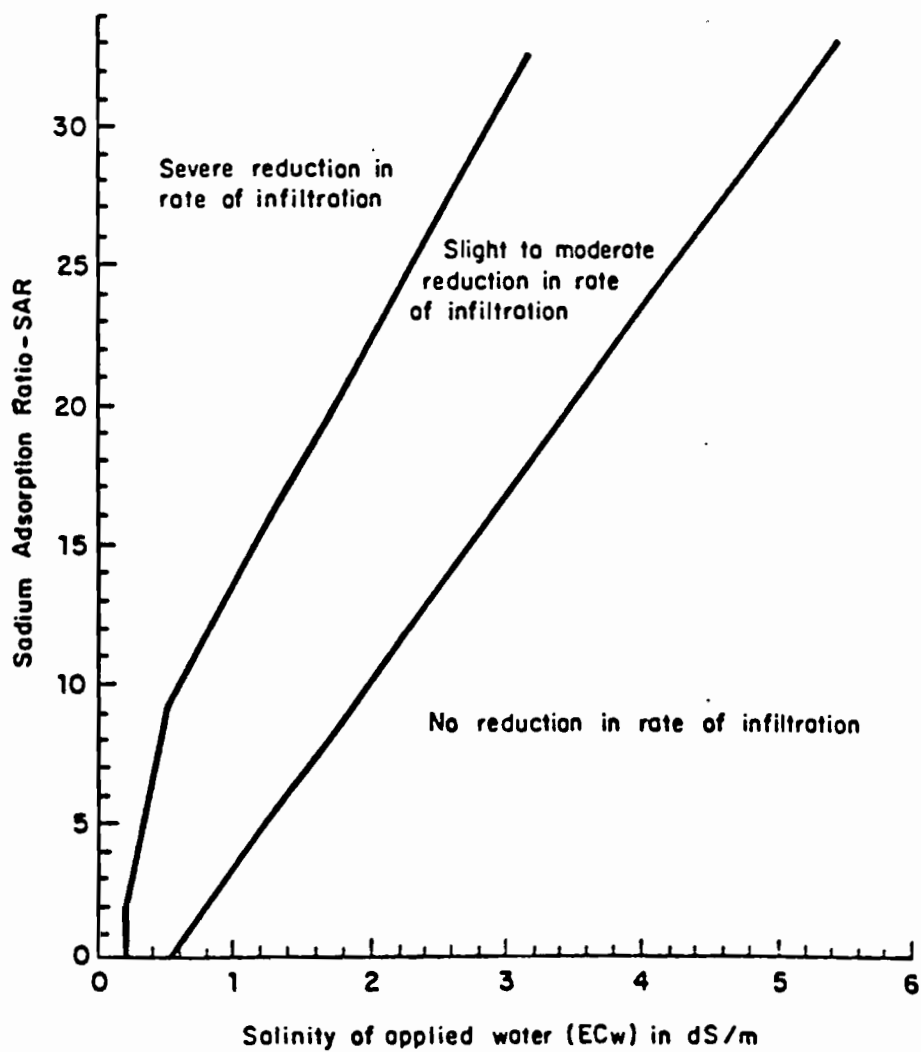
(d'après FAO, 1976 - Bulletin d'irrigation et de drainage n° 29)

et FAO, 1985

n°29 rev)

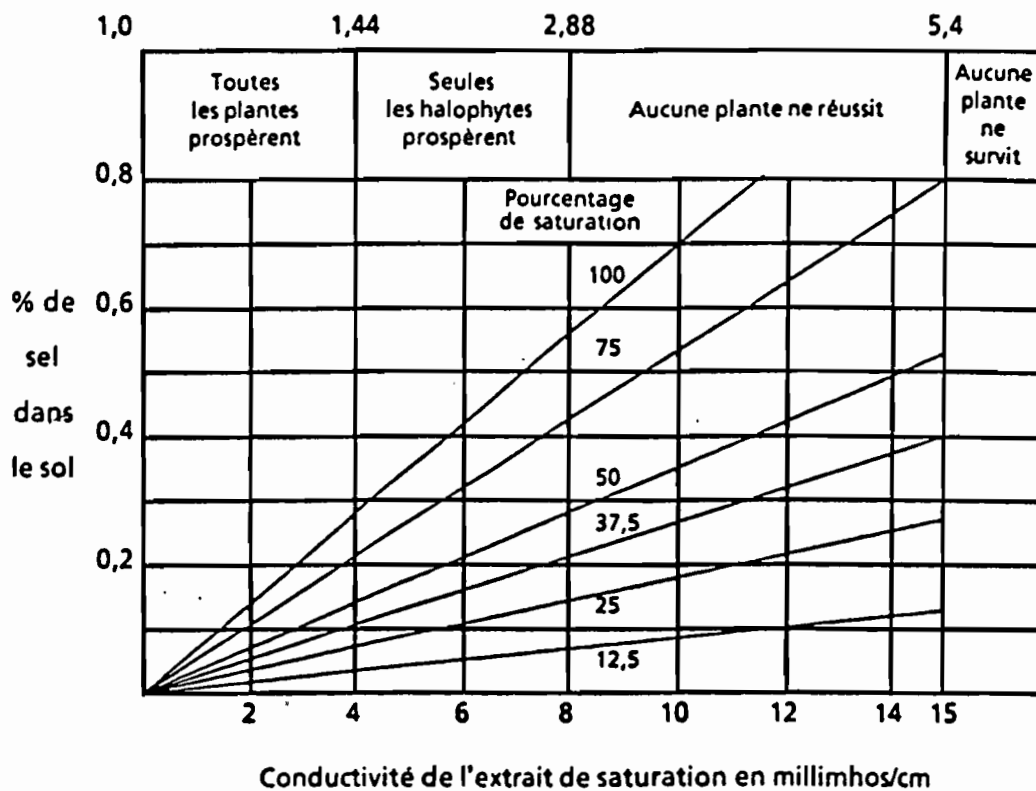
(tiré de FAO, 1985)

Relative rate of water infiltration as affected
by salinity and sodium adsorption ratio
(Adapted from Rhoades 1977; and Oster and
Schroer 1979)

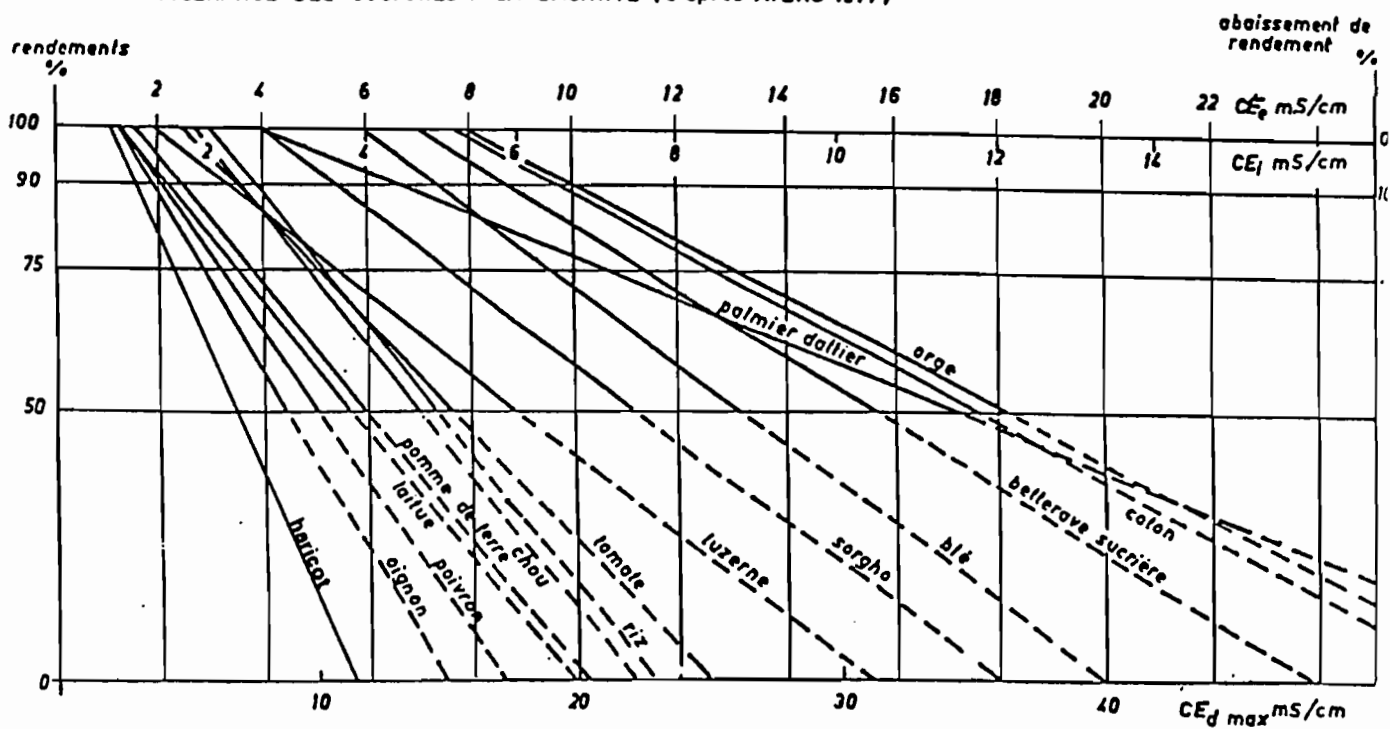


Représentation graphique de la croissance des plantes en fonction de la conductivité ou de la pression osmotique de l'extrait de saturation, et du pourcentage de sel dans un sol salin (d'après le U.S. Regional Salinity Laboratory) (dans HAYWARD - 1954).

Pression osmotique de l'extrait de saturation - Atmosphère



TOLÉRANCE DES CULTURES A LA SALINITÉ (d'après AYERS 1977)



CEe = Conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée du sol
 CEi = Conductivité électrique de l'eau d'irrigation

TABLE DE TOLERANCE DES CULTURES (FAO, 1976)

Baisse de rendement à prévoir pour certaines cultures en relation avec la salinité de l'eau d'irrigation, quand on emploie les méthodes usuelles d'irrigation de surface

CULTURES DE PLEIN CHAMP

CULTURES	0%		10%		25%		50%		MAXIMUM ECe ³
	ECe ¹	ECw ²	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	
Orge ⁴ (<i>Hordeum vulgare</i>)	8,0	5,3	10	6,7	13	8,7	18	12	28
Cotton (<i>Gossypium hirsutum</i>)	7,7	5,1	9,6	6,4	13	8,4	17	12	27
Betterave sucrière ⁵ (<i>Beta vulgaris</i>)	7,0	4,7	8,7	5,8	11	7,5	15	10	24
Blé ⁴ ⁶ (<i>Triticum aestivum</i>)	6,0	4,0	7,4	4,9	9,5	6,4	13	8,7	20
Carthame (<i>Carthamus tinctorius</i>)	5,3	3,5	6,2	4,1	7,6	5,0	9,9	6,8	14,5
Soja (<i>Glycine Max</i>)	5,0	3,3	5,5	3,7	6,2	4,2	7,5	5,0	10
Sorgho (<i>Sorghum bicolor</i>)	4,0	2,7	5,1	3,4	7,2	4,8	11	7,2	18
Arachide (<i>Arachis hypogaea</i>)	3,2	2,1	3,5	2,4	4,1	2,7	4,9	3,3	6,5
Riz (paddy) (<i>Oryza sativa</i>)	3,0	2,0	3,8	2,6	5,1	3,4	7,2	4,8	11,5
Sesbania (<i>Sesbania exaltata</i>)	2,3	1,5	3,7	2,5	5,9	3,9	9,4	6,3	16,5
Maïs (<i>Zea Mays</i>)	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9	10
Lin (<i>Linum usitatissimum</i>)	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9	10
Grosse fève (<i>Vicia Faba</i>)	1,6	1,1	2,6	1,8	4,2	2,0	6,8	4,5	12
Haricot dolique (<i>Vigna unguiculata</i>)	1,3	0,9	2,0	1,3	3,1	2,1	4,9	3,2	8,5
Haricot (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	1,0	0,7	1,5	1,0	2,3	1,5	3,6	2,4	6,5

CULTURES FRUITIERES

Palmier dattier (<i>Phoenix dactylifera</i>)	4,0	2,7	6,8	4,5	10,9	7,3	17,9	12	32
Figier (<i>Ficus carica</i>) Olivier (<i>Olea europaea</i>) Grenadier (<i>Punica Granatum</i>)	2,7	1,8	3,8	2,6	5,5	3,7	8,4	5,6	14
Pamplemoussier (<i>Citrus paradisi</i>)	1,8	1,2	2,4	1,6	3,4	2,2	4,9	3,3	8
Oranger (<i>Citrus sinensis</i>)	1,7	1,1	2,3	1,6	3,2	2,2	4,8	3,2	8

CULTURES	0%		10%		25%		50%		MAXIMUM ECe ³
	ECe ¹	ECw ²	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	
Citronnier (<i>Citrus limon</i>)	1,7	1,1	2,3	1,6	3,3	2,2	4,8	3,2	8
Pommier (<i>Malus sylvestris</i>) Poirier (<i>Pyrus communis</i>)	1,7	1,0	2,3	1,6	3,3	2,2	4,8	3,2	8
Noyer (<i>Juglans regia</i>)	1,7	1,1	2,3	1,6	3,3	2,2	4,8	3,2	8
Pêcher (<i>Prunus Persica</i>)	1,7	1,1	2,2	1,4	2,9	1,9	4,1	2,7	6,5
Abricotier (<i>Pyrus Armeniaca</i>)	1,6	1,1	2,0	1,3	2,6	1,8	3,7	2,5	6
Vigne (<i>Vitis spp.</i>)	1,5	1,0	2,5	1,7	4,1	2,7	6,7	4,5	12
Amandier (<i>Prunus dulcis</i>)	1,5	1,0	2,0	1,4	2,8	1,9	4,1	2,7	7
Prunier (<i>Prunus domestica</i>)	1,5	1,0	2,1	1,4	2,9	1,9	4,3	2,8	7
Môres (<i>Rubus spp.</i>)	1,5	1,0	2,0	1,3	2,6	1,8	3,8	2,5	6
Baies "Boysen" (<i>Rubus ursinus</i>)	1,5	1,0	2,0	1,3	2,6	1,8	3,8	2,5	6
Avocatier (<i>Persea americana</i>)	1,3	0,9	1,8	1,2	2,5	1,7	3,7	2,4	6
Framboisier (<i>Rubus idaeus</i>)	1,0	0,7	1,4	1,0	2,1	1,4	3,2	2,1	5,5
Fraisier (<i>Fragaria spp.</i>)	1,0	0,7	1,3	0,9	1,8	1,2	2,5	1,7	4

CULTURES MARAICHÈRES

Betterave ⁵ (<i>Beta vulgaris</i>)	4,0	2,7	5,1	3,4	6,8	4,5	9,6	6,4	15
Broccoli (<i>Brassica oleracea botrytis</i>)	2,8	1,9	3,9	2,6	5,5	3,7	8,2	5,5	13,5
Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	2,5	1,7	3,5	2,3	5,0	3,4	7,6	5,0	12,5
Concombre (<i>Cucumis sativus</i>)	2,5	1,7	3,3	2,2	4,4	2,9	6,3	4,2	10
Cantaloup (<i>Cucumis Melo</i>)	2,2	1,5	3,6	2,4	5,7	3,8	9,1	6,1	16
Epinard (<i>Spinacia oleracea</i>)	2,0	1,3	3,3	2,2	5,3	3,5	8,6	5,7	15
Choux (<i>Brassica oleracea capitata</i>)	1,8	1,2	2,8	1,9	4,4	2,9	7,0	4,6	12
Pomme de terre (<i>Solanum tuberosum</i>)	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	6,9	3,9	10
Maïs sucré (<i>Zea Mays</i>)	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	6,9	3,9	10
Patate douce (<i>Ipomoea Batatas</i>)	1,5	1,0	2,4	1,6	3,8	2,5	6,0	4,0	10,5
Poivron (<i>Capsicum annum</i>)	1,5	1,0	2,2	1,5	3,3	2,2	5,1	3,4	8,5
Laitue (<i>Lactuca sativa</i>)	1,3	0,9	2,1	1,4	3,2	2,1	5,2	3,4	9
Radis (<i>Raphanus sativus</i>)	1,2	0,8	2,0	1,3	3,1	2,1	5,0	3,4	9
Oignon (<i>Allium Ceps</i>)	1,2	0,8	1,8	1,2	2,8	1,8	4,3	2,9	7,5
Carotte (<i>Daucus Carota</i>)	1,0	0,7	1,7	1,1	2,8	1,9	4,6	3,1	8
Haricot (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	1,0	0,7	1,5	1,0	2,3	1,5	3,6	2,4	6,5

CULTURES FOURRAGERES

CULTURES	0%		10%		25%		50%		MAXIMUM ECe ³
	ECe ¹	ECw ²	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	
Chiendent à crête (<i>Agropyron conjugatum</i>)	7,5	5,0	9,9	6,6	13,3	9,0	19,4	13	31,5
Chiendent à crête (variété Fairway) (<i>Agropyron cristatum</i>)	7,5	5,0	9,0	6,0	11	7,4	15	9,8	22
Bermuda grass ⁷ (<i>Cynodon Dactylon</i>)	6,9	4,6	8,5	5,7	10,8	7,2	14,7	9,8	22,5
Orge fourrage ² (<i>Hordeum vulgare</i>)	6,0	4,0	7,4	4,9	9,5	6,3	13,0	8,7	20
Ray grass anglais (<i>Lolium perenne</i>)	5,6	3,7	6,9	4,6	8,9	5,9	12,2	8,1	19
Lotier, lotier corniculé ⁹ (<i>L. corniculatus tenuifolium</i>)	5,0	3,3	6,0	4,0	7,5	5,0	10	6,7	15
Alpiste bulbeuse (<i>Phalaris tuberosa</i>)	4,6	3,1	5,9	3,9	7,9	5,3	11,1	7,4	18
Fétuque élevée (<i>Festuca elatior</i>)	3,9	2,6	5,8	3,9	8,6	5,7	13,3	8,9	23
Chiendent à crête (<i>Agropyron desertorum</i>)	3,5	2,3	6,0	4,0	9,8	6,5	16	11	28,5
Vesce (<i>Vicia sativa</i>)	3,0	2,0	3,9	2,6	5,3	3,5	7,6	5,0	12
Sudan grass (<i>Sorghum sudanense</i>)	2,8	1,9	5,1	3,4	8,6	5,7	14,4	9,6	26
Seigle sauvage, sans barbe (<i>Elymus triticoides</i>)	2,7	1,8	4,4	2,9	6,9	4,6	11,0	7,4	19,5
Lotier des marais (<i>Lotus uliginosus</i>)	2,3	1,5	2,8	1,9	3,6	2,4	4,9	3,3	7,5
Luzerne (<i>Medicago sativa</i>)	2,0	1,3	3,4	2,2	5,4	3,6	8,8	5,9	15,5
Eragrostis ⁸ (<i>Eragrostis spp.</i>)	2,0	1,3	3,2	2,1	5,0	3,3	8,0	5,3	14
Mais (fourrage) (<i>Zea Mays</i>)	1,8	1,2	3,2	2,1	5,2	3,5	8,6	5,7	15,5
Trèfle berseem (<i>Trifolium alexandrinum</i>)	1,5	1,0	3,2	2,1	5,9	3,9	10,3	6,8	19
Dactyle pelotonné (<i>Dactylis glomerata</i>)	1,5	1,0	3,1	2,1	5,5	3,7	9,6	6,4	17,5
Vulpin des prés (<i>Alopecurus pratensis</i>)	1,5	1,0	2,5	1,7	4,1	2,7	6,7	4,5	12
Trèfle, trèfle hybride, trèfle blanc, trèfle violet, trèfle fraise (<i>Trifolium spp.</i>)	1,5	1,0	2,3	1,6	3,6	2,4	5,7	3,8	10

¹ ECe désigne la conductivité électrique de l'extrait de pâte de sol saturé, exprimée en millimhos par centimètre, à 25°C.

² ECw désigne la conductivité électrique de l'eau d'irrigation, exprimée en millimhos par centimètre, à 25°C. Cela suppose une fraction de lessivage d'environ 15-20 pour cent et une salinité moyenne de l'eau du sol prélevée par la culture qui est environ le triple de celle de l'eau d'irrigation appliquée (ECw = 3 ECe) et environ le double de celle de l'extrait de pâte de sol saturé (ECw = 2 ECe). D'après ce qui précède, ECe = 3/2 ECw. On peut préparer de nouvelles tables de tolérance des cultures d'après ECw pour des conditions s'écartant sensiblement de celles qui servent de point de départ aux Directives. Voici quelques relations estimées entre ECe et ECw pour différentes fractions de lessivage: LF = 10 pour cent (ECe = 2 ECw), LF = 30 pour cent (ECe = 1,1 ECw) et LF = 40 pour cent (ECe = 0,9 ECw). [Voir figure 2 et annexe C].

³ ECe maximum désigne la conductivité électrique maximum de l'extrait de pâte de sol saturé qui peut exister quand les cultures citées extraient l'eau de sol pour satisfaire leurs besoins d'évapotranspiration. A ce taux de salinité, la croissance végétale s'arrête (diminution de rendement de 100 pour cent) par suite de l'effet osmotique et du manque de disponibilité d'eau pour la culture (voir figure 5).

⁴ L'orge et le blé ont une tolérance moindre au stade de la germination et de la levée. ECe ne doit pas dépasser 4 ou 5 millimhos par centimètre.

⁵ Sensible durant la germination. ECe ne doit pas dépasser 3 millimhos par centimètre pour la betterave potagère et la betterave à sucre.

⁶ Ces tolérances peuvent ne pas s'appliquer aux nouvelles variétés semi-naines de blé.

⁷ Moyenne pour les variétés de Bermuda grass. Les variétés Sunonu et Coastal sont d'environ 20 pour cent plus tolérantes; le Courant et le Greenfield sont d'environ 20 pour cent moins tolérants.

⁸ Moyenne pour les variétés Boer, Wilman, Sand et Weeping. Le Lehman semble d'environ 50 pour cent plus tolérant.

⁹ Le lotier corniculé à feuille large semble moins tolérant que le lotier à feuille étroite.

Source: Données communiquées par Maas et Hoffman (1977); Bernstein (1964), et le Comité de consultants de l'université de Californie (1974).

SYMBOLES ET ABREVIATIONS TECHNIQUES

CTD	= quantité totale de matières solides dissoutes (en mg/l)
pH	= $-\log [H_3O^+]$
pHc	= pH calculé théorique de l'eau d'irrigation en contact avec la chaux et en équilibre avec le CO_2 du sol
SAR	= coefficient d'adsorption du sodium
SAR ajusté	= coefficient ajusté d'adsorption du sodium
ESP	= pourcentage de sodium échangeable
RSC	= carbonate de sodium résiduel (en meq/l)
Po	= potentiel osmotique (en bars)
LR	= besoin de lessivage
LF	= fraction de lessivage
ET	= évapotranspiration
t/ha	= tonnes par hectare

UNITES DE MESURE DES DONNEES PHYSICO-CHIMIQUES DES ANALYSES D'EAU :

CE ou EC = conductivité électrique, exprimée couramment en (FAO, 1976) :

Siemens/m (S/m)	=	10 mmhos/cm
dS/m	=	mmhos/cm
mS/cm	=	mmhos/cm
$\mu S/cm$	=	$\mu mhos/cm$

Cependant l'unité du Système International (MKSA) actuellement adoptée est le déciSiemens/m

CEe	= conductivité électrique de l'extrait de pâte du sol à saturation
CEs	= conductivité électrique de la solution de sol
CEw, CEir	= conductivité électrique de l'eau d'irrigation
CEd	= conductivité électrique de l'eau de drainage

mg/l	= milligrammes de soluté par litre de solution
meq/l	= milliéquivalents par litre de solution
mol/l	= moles par litre de solution (molarité)
mol/kg	= moles par kilo d'eau pure (molalité)
mole	= mole charge par kilo = un équivalent
ppm	= parts par million mg/l ~ ppm

SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALBERGEL (J.), BRUNET (D.), DUBEE (G.), MONTOROI (J.P.), ZANTE (P.), 1991. Gestion d'un barrage anti-sel en basse Casamance (Sénégal). In A. KERGREIS et J. CLAUDE (éd.), "Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride", Ed. AUPELF-UREF, John Libbey Eurotext, Paris, 275-285.

AL DROUBI (A.), FRITZ (B.), TARDY (Y.), 1976. Equilibres entre minéraux et solutions. Programmes de calcul appliqués à la prédiction de la salure des sols et des doses optimales d'irrigation. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, XIV(1): 13-38.

BOIVIN (P.), BRUNET (D.), 1990. Bilan de quatre années de suivi de la salure d'une vallée aménagée anti-sel par conductivimétrie électromagnétique et krigeage. *Multigr.*, ORSTOM/Dakar/Bondy, 12 p.

BOULAIN (J.), 1978. Cours d'hydropédologie. *Multigr.*, INA-ENGREF, 193 p.

Van BREEMEN (N.), 1973. Dissolved aluminium in acid sulfate soils and in acid mine waters. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 37, 694-697.

DUCHAUFOR (P.), 1988. Abrégé de Pédologie. Ed. Masson. 224 p.

DURAND (J.H.), 1983. Les sols irrigables. Etude pédologique. ACCT-PUF, 339 p.

FAO, 1976. La qualité de l'eau en agriculture. *Bull. Irrigation et drainage n°29*, Rome, 81 p.

JOB (J.Y.), 1992. Les sols salés de l'oasis d'El Guttar (Sud Tunisien). Thèse de Doctorat, Univ. Sci. Tech. Languedoc, Montpellier, multigr., 150 p.

LARAQUE (A.), 1991. Comportements hydrochimiques des açudes du nordeste brésilien semi-aride. Evolutions et prévisions pour un usage en irrigation. Thèse de Doctorat, Univ. Sci. Tech. Languedoc, Montpellier, multigr., 400 p.

MONTOROI (J.P.), 1992. Le contrôle de la salinité à l'aide de capteurs électriques. Application à un périmètre irrigué de la basse vallée de la Méjerdah (Tunisie). I- Le capteur électrique de salure. *L'Agron. Trop.*, 46, 3.

MONTOROI (J.P.), 1992. Le contrôle de la salinité à l'aide de capteurs électriques. Application à un périmètre irrigué de la basse vallée de la Méjerdah (Tunisie). II- La sonde quadripôle. *L'Agron. Trop.*, 46, 3.

MONTOROI (J.P.), ALBERGEL (J.), DOBOS (A.), FALL (M.), SALL (S.), BERNARD (A.), BRUNET (D.), DUBEE (G.), ZANTE (P.), 1992. A suitable water management for the rehabilitation of rice culture in the acid sulphate soils of lower Casamance (Senegal): a successful two years experiment. Fourth international symposium on acid sulphate soils, 2-6 Mars 1992, Ho Chi Minh Ville (Viêt Nam), 11 p.

RHOADES (J.D.), 1984. Principles and methods of monitoring soil salinity. In I. Shainberg and J. Shalhevet (Eds.), Soil salinity under irrigation. Processes and management, Berlin-Heidelberg- New York-Tokyo, 130-142.

ROBERT (M.), 1992. Le sol, ressource naturelle à préserver pour la production et l'environnement. Cah. Agricultures, 1,1, 20-34.

RICHARDS (L.A.), 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Handbook 60, U.S. Salinity Laboratory Staff. Washington, 159 p.

RIEU (M.), 1984. Cours "Dynamique des sols" (Equilibres sol-solution). Multigr., Univ. Tunis, 45 p.

RIEU (M.), MORENO (F.), CABRERA (F.), VAZ (R.), 1992. EXPRESO un modèle de simulation numérique de l'équilibre entre l'atmosphère, un sol échangeur d'ions et une solution du sol en cours de concentration ou de dilution. Application aux Marismas du Guadalquivir. Multigr., 16 p. (à paraître).

RPF, 1990. Référentiel Pédologique Français. AFES-INRA, Plaisir, 279 p.

SERVANT (J.M.), 1985. Les systèmes halomorphes. In "Séminaire "Sol et Eau", La Havane", Coll. et Sém. de l'ORSTOM, Paris, 607-621.

SOLTNER (D.), 1982. Les bases de la production végétale. Tome II: Le climat: météorologie, pédologie, bioclimatologie. Coll. Sci. et Tech. Agricoles, Angers, 312 p.