

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPOLAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE L'HYDRAULIQUE
ABDELLAH ARBAOUI**

DEPARTEMENT DES SPECIALITES

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN HYDRAULIQUE**

SPECIALITE : CONCEPTION DES SYSTEMES D'IRRIGATION - DRAINAGE

THEME:

**METHODES D' AMENAGEMENTS ET
PROCEDES AGRO TECHNIQUES DE LA
LUTTE CONTRE LA SALINISATION
DES SOLS**

Présenté par:

Mr. KIENOU ABDOUL FATRE

Promotrice:

M^{eme}. L.S BAHBOUH

DEVANT LE JURY COMPOSE DE:

Président : M^r. Y. DERNOUNI

Examineurs: Mr. KOLAI .D

Invités : M^{eme}. Mokrane

: M^{eme}. Aziez

...../...../JUILLET 2007

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

A mes Parents : Adama kienou, Alphoncine Diarra, Nanténé Camara, ma grande mère Nazouhan Koné.

A mes tontons et tantes : Abou kienou (paix a son âme), Mariam Kienou, Baba kienou, Kadia camara, Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma gratitude envers leurs affections, leur amour et les sacrifices qu'ils n'ont cessé de me faire durant toute ma vie scolaire.

A mes Frères : Ciprien, Aboubacar kienou, Mohammed Kienou, Lavieille kienou, Lassina kienou, Garba kienou, sidiki kienou.

Que ce travail vous témoigne mon amour et mon admiration fraternelle.

A mon ami Fily Dabo sissoko

A toute ma famille de Bamako, Mahou Kayes etc.

A tous ceux qui m'ont aidés de près ou de loin.

Remerciement

Au terme de cette étude, je remercie avant tout, Dieu tout puissant de m'avoir guidé durant toutes mes années de formation et m'avoir permis la réalisation de ce travail.

-Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à M^{eme} BAHBOUH L.S, ma promotrice, qui a bien voulu, par son aimable bienveillance, diriger ce travail qu'elle trouve ici l'expression de mon profond respect.

-Je tiens aussi à adresser mes remerciements à Monsieur Messahel et Oumar raïssi pour leurs bienveillances, leurs précieux conseils et encouragements.

-Mes remerciements les plus profonds à mes enseignants de l' ENSH qui ont contribué a ma formation durant ces 3 années passés dans cette école..

-Je tient a remercier Meme sissoko Fatoumata traore pour son soutien moral durant mes 5 années.

Mes remerciements a mes amis : Cheikna fofana, Youssouf kouriba, kassim Konaté, diony nouhoum, Seydou cissé.

-Mes remerciement a mes amis du Mali : Cesar, Baïchou, Bagnini, Boua, Mahamane, Tiose, Damis, by force, Madeleine.

-Mes remerciements a la famille Kienou, Sissoko (Mali)

-Aux membre de jury

Mr Y. Dernouni

Mr D. Kolai

M^{eme} Mokrane

M^{eme} Aziez

M^{eme} Bahbouh

Qui auront l'amabilité d'examiner mon travail et de l'apprécier à sa juste valeur.

-Mes remerciements a tous la promo 2006-2007 de L'ENSH et particulièrement ceux de l'option Irrigation.

-Mes remerciements a toute la communauté étrangère de Blida et particulièrement la communauté Malienne.

-Enfin je remercie tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.

ملخص :

أن نقص الماء المسجل في المناطق الجافة يتم تعويضه بالسقي بمياه معدنية . تسمح لنا هذه الدراسة بالتطرق إلى المشاكل التي قد تؤدي إلى ملوحة التربة ومعالجتها ، من أجل هذا أقيمت تجربة ميدانية على حقل في أقاليم الشلف .

أن السقي بلا تصريف للمياه الزائدة يتسبب في إرتفاع درجة الملوحة في المناطق التي توجد فيها المياه الجوفية بعيدة ، وقابلية التربة النفوذة قليلة .

أن استرجاع التربة للملوحة يستلزم تنسيق على المستوى الكيميائي إضافة الجبس على سبيل المثال ، والمستوى الميكانيكي (تقليب الأرض) فإذا كانت هذه المعايير ليست في محلها (استعمال كمية السقي ، قنوات الصرف ، تتبع درجة الملوحة ، فإن الملوحة نقص على مصير ومستقبل هذه التربة .

Résumé

Le déficit hydrique enregistré dans les zones arides est souvent comblé par des irrigations avec des eaux diversement minéralisées. Dans notre cas une étude bibliographique nous a permis de recenser tous les problèmes ayant trait à cette salinisation et ainsi que les méthodes de lutte contre la salinité. Une application pratique a été fait sur le périmètre du Haut Cheliff. En effet dans le périmètre du haut Cheliff, l'irrigation sans drainage provoque une augmentation de la salinité, particulièrement dans les zones où le niveau de la nappe peu profondes et le sol à faible perméabilité. La récupération des sols salins et sodiques requiert une combinaison de moyens chimiques (application du gypse par exemple) et mécanique (labour) afin d'éviter une évolution dans le temps.

Si des mesures adéquates ne sont pas mises en œuvre (maîtriser les doses d'arrosages, un réseau de drainage, suivi de la salinité et des mesures préventives et curatives efficaces de lutte contre la salinité) la salinisation des sols compromettrait l'avenir de ce périmètre.

Summary

The deficit of hydrous in the arid zones is often replaced by irrigation of water with variously mineral-bearing. In our case a bibliographic study allows us to recess all the problems of salinity and there by also the methods to prevent the salinity. A pratical application has been caromed on the perimeter of high cheliff.

High cheliff without drainage systems causes increase in salinity, especially the level of layers of soil are quiet thick and there by soil has less permeability. The recovery of sodium and saline soils, require a combinaison of chemical application (example gysum) and mechanical (labour) to avoid the wastage of time. If the adequate measure are not net during the process (the dose of watering, drainage system, the follow-up of salinity and the preventive ones measurements and the salinity against the curative effective ones of fight). The salinity of soils would deapalize with the future of the perimeter over.

Sommaire

I. Introduction :	0
-------------------	---

CHAPITRE I : ETUDE DE LA SALINITE

I. Historique :	1
II. Définition :	4
II.1 Action du climat :	4
II.2 Action du drainage :	5
II.3 Action de l'irrigation :	6
III. Type de salinisation :	6
III.1 Salinisation primaire ou naturelle :	6
III.2 Salinisation secondaire :	6
IV. Manifestation de la salinité	7
V. Origine de la salinisation des sols :	7
V.1 Origine continentale :	8
V.2 Origine maritime :	8
V.3 Origine volcanique :	10
V.4 Salinisation des lagunes littorales :	11
VI. Les causes principales de la salinisation des sols :	12
VI.1 Accumulation des sels dans le sol	12
VI.2 Processus de salinisation des sols	13
VI.3 Appréciation du niveau de salinité d'un sol :	16
VII. Mesure de la salinite des sols :	16
VII.1 Mesure au laboratoire	17
VII.2 Mesures in situ :	17
IX. Conclusion :	18

CHAPITRE II : CLASSIFICATION DES SOLS SALEES

I. Classification des sols :	19
I.1 La classification Française :	19
I.1.1 Les sols salins non alcalins : $CE > 4$ mmho/cm et $ESP < 15\%$	19
I.1.3 Les sols alcalins et salin : $CE > 4$ mmho/cm et $ESP > 15\%$	20
I.2 La classification russe :	21
I.2.1 Les Solontchacks :	21
I.2.2 Les solonetz :	22
I.2.3 Les solods :	22
I.3 La classification de la FAO :	22
I.4 Classification par rapport à leur teneur en sels :	23
II. carte de situation des sols	24
II.1 Des sols salins dans le Monde :	24
II.2 Sols alcalins	24
III. Conclusion :	25

CHAPITRE III: QUALITE DES EAUX EN IRRIGATIONS

I. Historique:	27
II. Qualite des eaux en irrigation :	28
II.1 La salinité :	28
II.2 La toxicité :	28
II.3 Incidence sur les propriétés physiques du sol :	28
III. Caracterisation des eaux d'irrigations:	29
III.1 Définition de la salinité d'une eau :	30
III.2 Mesure de la salinité d'une eau :	30
IV. Classification des eaux d'irrigations :	30
IV.1 Classification mondiale de la FAO (g/l):	30
IV.2 Classification Américaine :	31
IV.2.1 Classification USSL(United States Salinity Laboratory) :	31
IV.2.1.1 Classification selon la salinité de l'eau CE :	31
IV.2.1.2 Classification selon le risque d'alcalinisation SAR :	32
IV.2.2 Classification de christiansen et al. (1977) :	33
IV.2.3 Classification des sols en Algérie selon DURAND :	34
V . Risque et mesure de l'alcalinité :	36
V.1 Conséquence de l'alcalinisation :	40
VI. Risque de toxicité particulière:	41
VI.1 Guide général pour la caractérisation d'une eau d'irrigation :	42
VII. Qualité de l'eau et technique d'irrigation :	43
VII.1 Méthodes d'irrigation:	43
VII.1.1 Irrigation par raie et la salinisation :	45
VII.1.2 Système complet de goutte - à - goutte:	45
VII.1.3 Irrigation par asperseur (sprinkler irrigation) :	47
VII.2 L'irrigation et quelques uns de ses effets possibles :	48
VIII. Utilisation des eaux salées en irrigation :	51
VIII.1 Comment utiliser une eau salée en irrigation:	51
VIII.2 QUELQUES EXEMPLES D'UTILISATION D'EAUX SALEES DANS LE MONDE :	52
VIII.2.1 Utilisation d'eaux salées aux Etats-Unis :	52
VIII.2.2 Utilisation d'eaux salées en Israël :	52
VIII.2.3 Utilisation d'eaux salées en Tunisie :	53
IX. Utilisation des eaux usées a des fins agricoles:	53
IX.1 Techniques de la reutilisation des eaux usées :	54
X. Conclusion:	55

CHAPITRE IV : EFFET DE LA SALINITE

I. Effets de la salinité sur les plantes :.....	55
I.4. Toxicité d'ions particuliers	56
II. EFFETS DES SELS SUR LE SOL:.....	58
II.1 Effets spécifiques des ions :	58
II.2.1 Le sodium.....	59
II.2.2 Le magnésium.....	60
II.2.3 Les chlorures et les sulfates	60
II.2.4 Le bore.....	60
II.2.5 Le bicarbonate.....	61
II.2.6 Le calcium :	61
III.2.1 Procédés de lutte contre la toxicité :	61
IV.1 Tolérance des plantes à la salinité.....	62
IV.2.1 Phénomènes d'échange cationique dans les sols.....	65
IV.2.2 Effets de la salinité sur le complexe adsorbant.....	66
IV.3 Evolution de la salure du sol avec l'utilisation d'eaux salées.....	67
VIII. prévision (prédiction de la salinité des sols à l'aide des bilans hydriques au niveau de la parcelle sur un hectare :.....	68
VIII.1 bilan hydrique avant irrigation :	68
VIII.2 Bilan hydrique après irrigation :	70
VIII. Conclusion :	73

CHAPITRE V : METHODE DE LUTTE CONTRE LA SALINISATION DES SOLS

I Introduction.....	74
II. Méthodes d'aménagement et procédés agro techniques de lutte contre la salinisation :	75
II.1 Différentes méthodes de lutte contre la salinisation des sols :.....	75
II.2 Méthodes d'aménagement des sols :	75
II.2.1 1 ^{eme} cas : aménagement contre l'intrusion marine :.....	76
II.2.1 2 ^{er} cas : aménagement sur une île volcanique :	76
II.2.3 3 ^{eme} cas : aménagement d'une riziculture :	77
II.3 Méthodes agro techniques :	79
II.3.1 Le lessivage :	79
II.3.1.1 Définition du lessivage :	80
II.3.1.2 types de lessivage	80
II.3.1.3 Lessivage initial.....	80
II.3.1.4 Lessivage d'entretien.....	80
II.3.1.5 Lessivage capital des sols salés :	81
II.3.2 Amélioration des sols salés par lessivage :	81

II.3.3	Calculs des doses de lessivages :	83
II.3.3.1	Notion de bilan salin dans le sol :	83
II.3.3.2	Dose de lessivage :	83
II.3.3.2.1	L'expression de valoubeev 1975	84
II.3.3.2.2	L'expression D'Averianov	84
II.3.3.4	Lessivage d'entretien :	85
II.3.3.4.1	Détermination de la dose de lessivage avec la méthode de la conductivité électrique CE :	85
II.3.3.4.2	L'intensité du lessivage :	87
II.3.3.4.3	Lessivage des sols alcalins :	89
II.3.4	Technologie d'application de l'eau de lessivage :	90
II.3.4.1	Méthode de submersion :	90
II.3.4.2	Méthode de ruissellement rapide :	91
II.3.4.3	Méthode combinée :	91
II.3.4.4	Quelques informations sur les essais réalisés par le CRUESI EN Tunisie :	92
II.3.4.4.1	Essais réalisés sur la station de Utique :	92
II.4	Le drainage	95
II.4.1	Recyclage des eaux de drainage :	97
II.4.2	Principales méthodes de drainage :	98
II.5	Paillage ou Mulching :	99
II.6	Les Amendements :	99
II.6.1	Type et utilisation des amendements :	100
II.6.1.1	Types d'amendements et leurs actions	100
II.6.1.2	Utilisation des amendements :	103
II.6.1.2.1	Amendements dans le sol ou dans l'eau :	103
II.6.1.2.2	Utilisation du soufre	105
II.6.1.2.3	Utilisation de l'acide sulfurique :	105
II.6.1.2.5.1	Caractéristiques du phosphogypse :	110
	Action commune sur le comportement des sols salés :	113
II.6.1.2.5.3	Le problème du Fluor :	113
III.	Evaluation du problème de perméabilité :	118
III.1	Solutions d'aménagement aux problèmes de perméabilité :	118
IV.	Récupération des sols salés en résumé :	119
IV.1	Amélioration des sols salins et des sols sodiques	119
IV.2	Amélioration des sols salins	120
IV.3	Amélioration des sols sodiques	121
V.	Suivi et contrôle de la salinité dans les périmètres irrigués :	122
VI.	Précautions à prendre après une (re)mise en valeur :	124
VII.	Conclusion :	124

CHAPITRE VI : ETUDE DE CAS

I. Présentation du périmètre du Haut Cheliff :	125
I.1 Situation géographique.....	125
I.2 La plaine d'El Khemis :	125
I.3 Aperçu historique sur les plaines du Haut Cheliff :	126
II. Climatologie :	127
II.1 Pluviométrie :.....	127
II.1.1 Pluviométrie moyenne annuelle :.....	127
II.1.2 Température :.....	127
II.1.3 Régime thermique :.....	128
II.1.4 Vent :.....	129
II.1.5 Gel :.....	129
II.1.7 Evaporation :.....	129
II.1.8 Humidité relative :.....	130
II.1.9 Brouillard :	130
II.1.10 Insolation :.....	130
II.1.11 Indice climatique :.....	131
II.1.11.1 Indice d'aridité de Martonne :.....	131
III. Hydrologie :.....	132
III.1 Les eaux superficielles :	132
IV. Géologie :.....	133
V. Hydrogéologie :	133
V.1 Le Miocène Inférieur :.....	134
V.2 Le Miocène Supérieur :	134
V.3 Le Pliocène :	134
V.4 Le Quaternaire :.....	134
V.5 Caractéristiques hydrogéologiques de la nappe alluviale de Haut Chélif :	134
VI. Pédologie.....	135
VI.1 généralité sur les sols de la plaine :	135
VII. Etude de la Piézométrie :.....	136
VII.1 Les eaux de la nappe.....	136
VIII. Application pratique à un cas	138
VIII. Dose d'irrigation et lessivage	138
VIII. calcul de la dose de lessivage	139
IX. Etude de la vulnérabilité des sols par rapport a la Salinité.....	140
IX.1 Autre présentation graphique à partir du SURFER	146
(un logiciel).....	146
X. Conclusion générale de ce chapitre :	149
Conclusion Générale et recommandation :	151

LISTE DES TABLEAUX

Tableau N°1: superficie affectées par la salinité dans le monde.....	2
Tableau N°2 pourcentage des terres irriguées atteintes par la salinisation dans certains pays méditerranéen	3
Tableau N°3 : recapitulatif.....	20
Tableau N°4: classification des sols salés et effets sur les cultures.....	22
Tableau N°5 : Classification de Christiansen.....	33
Tableau 6 Classification de l'eau d'irrigation basée sur la concentration totale en sels, selon différentes sources.....	34
Tableau N° 7:Risque des bicarbonates pour l'eau d'irrigation.....	38
Tableau N°8 : Classes s'eaux d'irrigation d'après leur teneur en bore et tolérantes relative des cultures.....	41
Tableau N°9 : Quelques valeurs de μ	84
Tableau N°10 : Quelques valeurs de A.....	85
Tableau N°11: Les valeurs de λ	85
Tableau N°12: Recyclage des eaux de drainage.....	97
Tableau N°13 :solubilité du gypse dans les différentes solutions de Na Cl à 20°C.....	109
Tableau N°14: composition chimique du phosphogypse du complexe ASMIDAL D'ANNABA.....	111
Tableau N°15 :composition chimique du phosphogypse utilisé en Hongrie.....	113
Tableau N°16 : solubilité du phosphogypse du complexe à différentes concentrations en chlorure de sodium.....	113
Tableau N°17 : effet du fluor sur la production (g/pot) du blé à un taux de sodium échangeable de 30%.....	115
Tableau N°18: Amendement de l'eau et du sol et efficacité relative du point de vue de l'apport de calcium.....	116
Tableau N°19: pluviométrie moyenne mensuelle.....	127
Tableau N°20 Température moyen mensuelle.....	127
Tableau N°21 vitesse du vent	129

Tableau N°22 nombre de jour de gelé.....	129
Tableau N°.23 : Moyenne mensuelle de l'évaporation.....	130
Tableau N°24: Les valeurs de l'humidité relative de l'air.....	130
Tableau N°25: Nombre moyen de jours de brouillard.....	130
Tableau N°26 Moyenne mensuelle de l'insolation.....	131
Tableau 27: Limite des climats d'après l'indice climatique de Martonne.....	131
Tableau 28: salinité moyenne des eaux superficielle.....	132
Tableau N°29:composition chimique de l'eau de l'oued.....	133
Tableau n°30: les différentes caractéristiques des formations aquifères	135
Tableau N°31: granulométrie-caractéristiques hydriques d'un sol.....	136
Tableau N°32 : composition chimique des eaux de la nappe.....	137
Tableau N°33 :les besoins et volumes d'eau délivrés aux cultures.....	138
Tableau N° 34 :Variation de la pluviométrie dans le Haut Cheliff DURANT 6 ANS :.....	140
Tableau N° 35 : Variation de la conductivité et du SAR dans le Haut Cheliff DURANT 6 ANS :.....	142

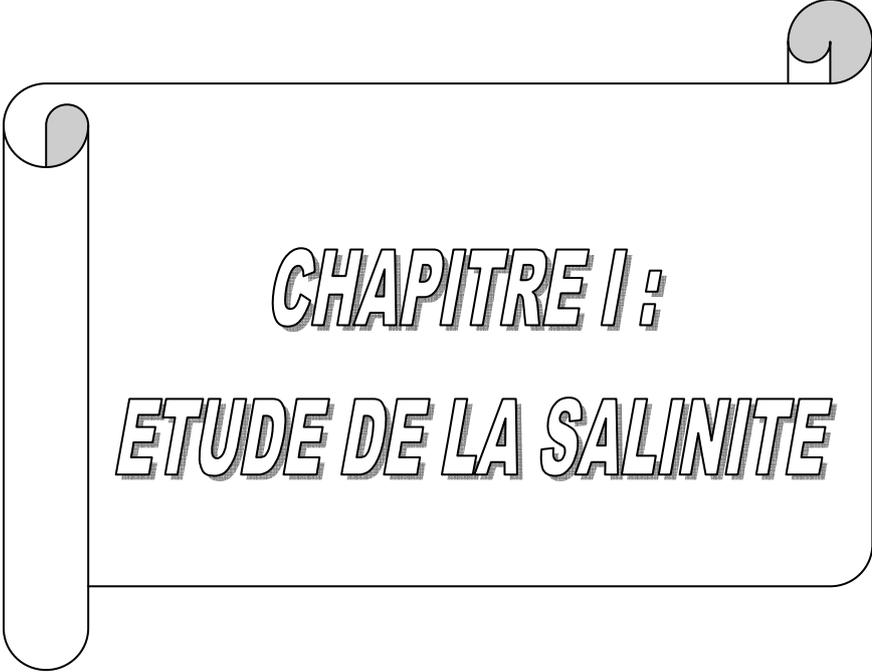
Liste des figures :

Figures	N° de page
Figure N°1 : manifestation de la salinité.....	6
Figure N°2 :Déforestation des versants en Thaïlande.....	13
Figure N°3 :Bilan hydrique avant irrigation.....	15
Figure N°4 :Bilan hydrique après irrigation.....	17
Figure N°5 : l'image spot dans les périmètres du Pakistan.....	20
Figure N°6 : carte des sols salins dans le monde.....	29
Figure N°7 : carte des sols alcalins dans le monde.....	29
Figure N°8 : schéma de l'irrigation par raie.....	50
Figure N°9 : schéma du système goutte à goutte	50
Figure N°10 : Schémas de la diffusion de l'humidité dans des sols.....	51
Figure N°11: effet de la salinité du sol sur le rendement des récoltes.....	62
Figure 12 : Coupe transversale de feuilles trifoliées.....	63
Figure N°13 : Vitesse d'absorption de l'eau par des racines.....	64
Figure N°14 : (a) Teneur des feuilles en eau et (b) succion de solutés de sève extraite des feuilles de tomate	65
Figure N°15 : Rendement de haricot en fonction de la succion de soluté dans une solution nutritive avec ou sans addition de différents sels.....	67
Figure N°16 :a) rendement escomptable b) relation rendement et salure.....	77
Figure N°17 : aménagement sur une île volcanique :.....	84
Figure N°18 : schéma type d'un périmètre irrigué bien aménagé.....	85
Figure N°19: l'image spot dans les périmètres du Pakistan.....	132
Figure N°20 :Schéma de représentation du Haut Cheliff.....	135
Figure N° 21 : graphe des températures.....	137
Figure N°22 : Diagramme de Gaussen.....	137
Figure N° 23 : Evolution de la pluviométrie durant 6 ans.....	149
Figure N°24 : Variation de la conductivité électrique et celle du Sar.....	152
Figure N° 25 :Vulnérabilité des sols du périmètre du Haut Cheliff face à la salinisation (conductivité électrique) et à l'alcalinisation (SAR).....	154

INTRODUCTION :

L'irrigation est un moyen d'apport d'eau assurant les conditions nécessaires pour la croissance des cultures agricoles. De part le monde, les terres irrigables sont très importantes. Pour des raisons de survie (auto suffisance alimentaire) et d'économie (exportation), l'Homme s'est forcé à aménager certaines parties de ces terres favorables à l'irrigation. La gestion et l'exploitation de ces périmètres garantissent aujourd'hui une production agricole de qualité et en quantité considérable grâce à des techniques ingénieuses. Cependant le domaine de l'irrigation est de nos jours menacé par des problèmes de plus en plus cruciaux. En dépit de la rareté des pluies et de leur inégale répartition, les terres irriguées se dégradent à vitesse exponentielle par accumulation des sels dans les horizons supérieurs. En effet ce phénomène est dû soit à la présence des sols initialement salés, soit par apport des sels par les eaux d'irrigation ou parfois par remontée d'une nappe salée soumise à une forte évaporation. La salinité des sols est présente dans la plupart des grands systèmes d'irrigation à travers le monde sous l'effet conjugué d'une mauvaise qualité des eaux d'irrigation, de l'aridité et d'un drainage insuffisant du sol et des aquifères. Les tendances évolutives dans la gestion de l'eau et la salinité des sols sont évaluées à travers différents travaux réalisés à travers tous les continents. La salinisation apparaît comme la conséquence de divers processus complexes de redistribution des sels liés au fonctionnement hydrologique du milieu sous l'influence de l'irrigation et du drainage. Ces évolutions résultent de modifications induites par la gestion agricole de l'eau dans différents contextes liés à un drainage insuffisant, à une utilisation accrue d'eaux souterraines ou de drainage de mauvaise qualité en situation de pénurie, ou encore au rejet des eaux de drainage en aval des aménagements. La gestion de la salinité nécessite une méthode appropriée permettant à la fois de comprendre les processus impliqués et d'évaluer les décisions à adopter en matière de gestion et de planification en fonction de la situation actuelle et des évolutions

attendues. La distribution spatiale de la salinité peut être caractérisée à des dates spécifiques par télédétection aux petites échelles et par cartographie des sols aux plus grandes échelles. Alors des mesures adéquates doivent être mises en œuvre afin de palier à ce danger. Ainsi les chercheurs ont pensé à la mise en valeur des terres irriguées par un ensemble de méthodes et de techniques de mesure pouvant assurer le dessalage et prévenir et lutter contre la salinisation primaire et secondaire, et c'est dans cet objectif que nous avons orienté notre travail. Une étude bibliographique nous a permis de recenser l'ensemble de ces procédés, que nous avons mis bien entendu en application pratique sur une zone irriguée qui est le Haut cheliff.



CHAPITRE I :
ETUDE DE LA SALINITE

Chapitre I :

Etude de la salinité des sols

I. Historique :

La salinité a eu des effets sur l'agriculture depuis très longtemps. Depuis cinq mille ans, les peuples de la Mésopotamie ont cultivé le Croissant fertile des rivières du Tigre et de l'Euphrate (actuellement Turquie et Iraq), une des terres agricoles les plus riches du monde de l'époque. Quand le sel a commencé à s'accumuler dans le sol, résultat de lessivage et de drainage inadéquats de l'eau d'irrigation, la principale culture pratiquée a changé du blé à l'orge qui est plus tolérante à la salinité. Par la suite, les sels se sont accumulés au point que rien ne peut croître et la terre a été abandonnée (Hadas, 1965). Les sels ont été reconnus comme un problème depuis des milliers d'années, particulièrement dans les régions arides et semi-arides où il n'y a pas suffisamment de pluie pour lessiver les sels au-delà de la zone racinaire (Miller and Donahue, 1995). Comme la croissance des plantes est sévèrement inhibée par des concentrations en sels solubles au-dessus d'une certaine limite, le maintien d'une production agricole dans ces régions nécessite une série de mesures permettant le déplacement, par lixiviation, des sels apportés au sol. En même temps, ceci montre la nécessité d'un "dépôt" approprié sinon on aura un simple transfert de sels vers une autre localisation. Ceci indique que les problèmes de salinité et de sodicité des sols ne peuvent pas ou ne doivent pas être étudiés ou résolus au niveau du profil de sol sur place seulement. En plus de son effet sur la concentration de la solution du sol, l'addition des sels au profil du sol peut entraîner l'altération de la composition du complexe d'échange: augmentation de la proportion de sodium échangeable sur le complexe adsorbant car les sels de sodium sont les plus solubles dans la nature et donc ceci va entraîner la sodication ou la formation de sols sodiques. La vitesse de sodication

dépend de la composition de l'eau utilisée, de la quantité d'eau apportée par année et de la Capacité d'échange cationique (CEC) du sol.

La salinité dans le monde :

Fait : selon la FAO

- ❖ De 10 à 15% des surfaces irriguées (20 à 30 millions d'hectares) souffrent, à des degrés divers, de problème de salinisation.
- ❖ 0,5 à 1% des surfaces irriguées sont perdues pour la culture pour chaque année (1,5 à 2 millions d'hectares).
- ❖ Prés de la moitié de toutes les surfaces irriguées sont menacées à long terme.

Selon LASRAM.M (1995) la salinité touche environ un milliard d'hectare dans le monde situés principalement dans les régions arides et semi-arides externes : Vingt millions d'hectares sont atteints par la salinité chaque année. Les terres irriguées affectées par la salinité correspondent à 27% des surfaces irriguées dans le monde soit environ 1/3 des terres agricoles dans les régions arides et semi-arides qui sont affectées par un excès de sel.

Tableau N°1 : superficie affectées par la salinité dans le monde

régions	En millions d'hectare
Afrique	80,5
Europe	50,8
Amérique du Nord	15,70
Amérique du Sud	129,20
Asie du sud	87,6
Asie du sud-est	20
Asie centrale et du Nord	211,70
Australie	357,30
Mexique et Amérique centrale	2
Total	954,8

Source LASRAM.M (1995)

Selon la même source, plus de la moitié des terres irriguées du monde sont salées, sodique ou sujette à l'engorgement à cause de l'adoption de

méthode d'irrigation inadéquate de mauvaises système de drainage et de l'utilisation des eaux salées.

Toujours selon le même auteur la salinité dans le pourtour méditerranéen couvre 80 millions d'hectares. L'avenir semble plus sombre dans les pays du sud de la méditerranéen ,car l'agriculture sera obligée d'avoir recours de plus en plus à l'eau salée ce qui contribue au processus de salinisation secondaire qui s'étend dans la région à un taux accéléré et qui créera de graves problèmes économiques.

Tableau N°2 : pourcentage des terres irriguées atteintes par la salinisation dans certains pays méditerranéens

Pays	% de terre atteinte
Algérie	10-15
Chypre	25
Egypte	30-40
Espagne	10-15
Israël	13
Grèce	7
Jordanie	16
Maroc	10-15
Portugal	10-15
Syrie	30-35

Source LASRAM (1995)

II. Définition :

La salinisation du sol est le processus d'accumulation de sels à la surface du sol et dans le zone racinaire qui occasionne des effets nocifs sur les végétaux et le sol ; il s'en suit une diminution des rendements et ; à terme, une stérilisation du sol.

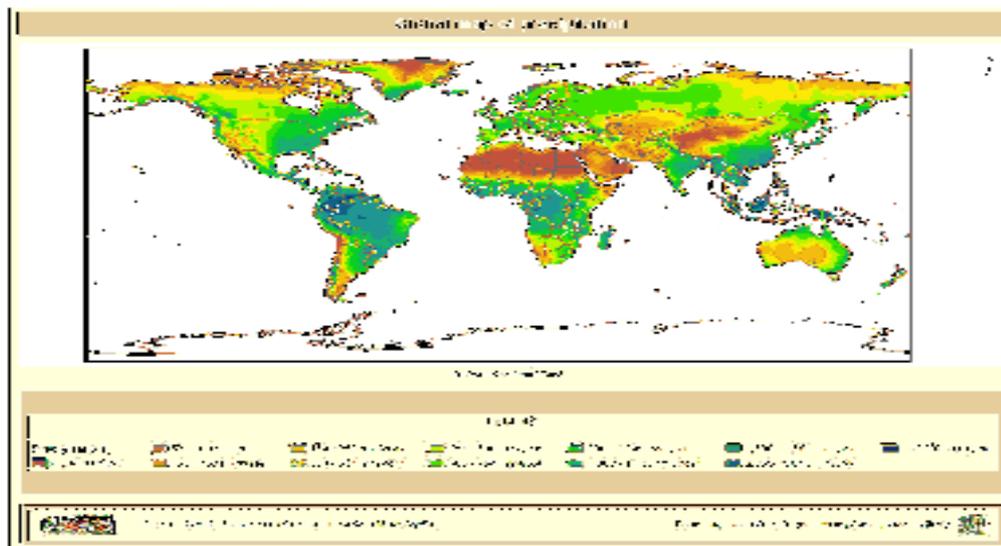
Trois facteurs interviennent dans la salinisation qui sont :

- Le climat
- Le drainage
- L'irrigation

II.1 Action du climat :

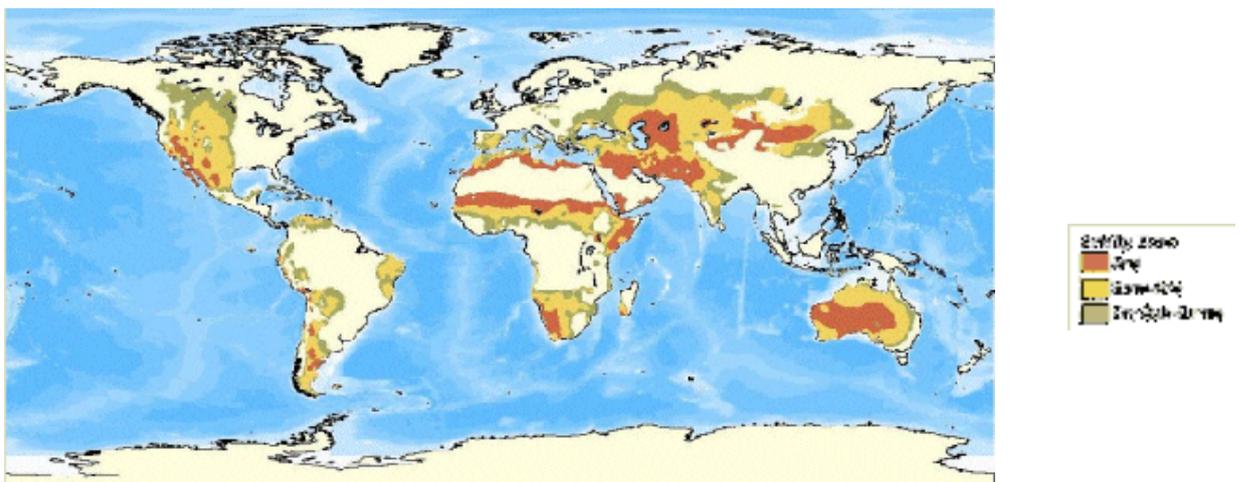
Les sols salins sont pratiquement inexistant dans les régions de climat humide où la profondeur de percolation des eaux de pluie entraîne les sels solubles originaires présents dans le sol, ou formé à partir des minéraux du sol sous l'action des agents naturels. Dans les régions arides ou semi-arides, le lessivage et le transport des sels solubles n'existent pas, de plus l'évapotranspiration intense qui caractérise ces climats favorise la concentration des sels dans le sol.

Figure N°1 – La carte mondiale des précipitations



Carte mondiale des zones arides :

Figure N°2 : carte mondiale des zones arides



Source Handicap International 2000

II.2 Action du drainage :

Une condition essentielle de la salinisation des sols est l'existence de mauvaises conditions de drainage.

Les causes d'une mauvaise drainage sont :

Une topographie défavorable ne permet pas de déboucher vers un cours d'eau et provoquant ainsi une remontée de la nappe phréatique.

- Une faible perméabilité du sol empêchant les mouvements de l'eau.
- Une texture ou une structure défavorable du sol.
- La présence de couche restrictives imperméable (couche d'argile ou semelle de labour).

II.3 Action de l'irrigation :

Si l'on trouve naturellement des sols salés, il apparaît que ces problèmes de salinité se posent le plus souvent lorsque des sols précédemment non salé deviennent salin par l'effet de l'irrigation. Cette salinisation par l'irrigation est le fait :

- ❖ D'un mauvais choix des sols irrigables ;
- ❖ Des eaux d'irrigations qui peuvent contenir jusqu'à 4 tonnes de sels pour 1000m³. Des quantités considérables des sels solubles sont ainsi ajoutées aux sols irriguées sur une période relativement courte.

III. Type de salinisation :

III.1 Salinisation primaire ou naturelle :

Due aux sels se formant lors de l'altération des roches ou à des apports naturels externes :

- ❖ Dans les régions côtières, intrusion d'eau salée ou submersion des terres basses ;
- ❖ Inondation périodique par de l'eau de qualité moindre ;
- ❖ La remontée d'une nappe phréatique salée près de la zone racinaire.

III.2 Salinisation secondaire :

- ❖ Induite par l'activité humaine ; liée fréquemment à des pratiques agricoles inappropriées.

Salinisation des sols en Mésopotamie durant l'Antiquité

Evolution des surfaces cultivées en blé et en orge

	Blé	orge
3 500 ans av. J.C.	51%	49%
2 500 ans av. J.C.	17%	83%
1 500 ans av. J.C.	0%	100%

IV. Manifestation de la salinité :

La Salinisation se manifeste soit :

- ❖ Une baisse de rendement ;
- ❖ la germination retardée/réduite;
- ❖ la croissance rachitique;
- ❖ les dégâts foliaires;
- ❖ les croûtes de sel;
- ❖ les terres engorgées.
- ❖ Par des couches blanchâtres a la surface du sol.

Figure N°3 : manifestation de la salinité



V. Origine de la salinisation des sols :

Heureusement notre connaissance des phénomènes géologiques moins anciens est mieux assurée, et on sait actuellement que la salure avec laquelle le pédologue se trouve confronter peut avoir trois origines distinctes :

- La salure peut être provoquée par le contact de la mer (salure d'origine marine)
- Elle peut provenir de couches sédimentaires salifères (salure d'origine continentale ou géologique).
- Elle peut se rattacher à certaines manifestations, généralement posthumes, du volcanisme (salure d'origine volcanique).

A chacune de ces origines correspond un ou plusieurs modes de salinisation, mais chacun d'eux conduit à un type de salure qui est marqué par l'origine. Nous verrons cependant qu'il existe un mode de salinisation intermédiaire, et enfin la géographie ou la structure géologique de certaines régions peuvent faire que des types de salure d'origine différente s'y superposent. Nous allons examiner brièvement et caractériser succinctement les principaux modes de salinisation.

Il existe 3 origines les plus connus qui sont :

- ❖ origine continentale
- ❖ Origine volcanique
- ❖ Origine maritime

V.1 Origine continentale :

Suite à une évolution géologie (érosion éolienne, hydrique) peut provenir des couches continentales salifères et cela s'explique par un environnement géologique surtout les territoires algériennes et celle du Maghreb en général. En effet les couches salifères placés dans le relief par des mouvements tectoniques, dans le temps ont contribué à former des sols dont le matériau d'origine est salé ou bien on participer à la salinisation des sols par apport d'eau contenant des sels solubles après ruissellement ou infiltration. En fin de compte le contact de ces couches de sel et de l'eau sert de mécanisme à la redistribution de ces sels solubles et

montre l'importance de l'hydrologie des bassins versants dans cette redistribution .

V.2 Origine maritime :

Cette salinisation est produite par les processus qui nous sont contemporains, et dont les effets présentent comme caractéristique d'être marqués par leur actualité. Ces processus sont au nombre de quatre.

➤ Le premier consiste dans une submersion des terrains par la mer au cours de tempêtes, de marées exceptionnelles, de raz-de-marée, ou à l'occasion de la rupture de digues de protection. Les inondations qu'a subies la Hollande en 1953 restent un exemple de ce mécanisme : elles étaient dues à la coïncidence d'une tempête et d'une forte marée.

➤ Le deuxième processus de salinisation marine est déclenché par les infiltrations de la mer dans une nappe phréatique littorale, constituée originellement par des eaux douces : celle-ci deviennent plus ou moins salées ou saumâtre, et la contamination des terres s'opère soit naturellement à la suite d'une remontée du niveau phréatique, soit par l'intervention de l'homme, qui procède à des pompages inconsidérés dans la nappe et à des irrigations au moyen d'eau salée. On notera le caractère insidieux de ce processus de salinisation : il peut rester inaperçu à des yeux inexpérimentés.

➤ Le troisième processus de salinisation marine présente également ce même caractère. Il s'agit du sel qui est apporté par les embruns que le vent rabat sur la terre ou sur la végétation. Ces apports produisent des accumulations capables d'être nuisibles aux cultures quand le phénomène rencontre des conditions très favorables : fréquence des vents capables d'assurer le transport de ceux-ci vers la terre, enfin et surtout aridité du climat, car il suffit d'une pluviométrie moyenne pour supprimer ces accumulations.

➤ Enfin le quatrième processus de salinisation marine se développe au cours de la genèse des dépôts littoraux. Les vases marines qui se fixent et s'accumulent sur certaines côtes (slikke et schorre) sont imprégnés de

salant marin et les sols qui en dérivent sont donc salés congénitalement. Il en est de même des dépôts d'estuaire, car la floculation des sédiments fins (argiles, limons) apportés par les cours d'eau, est provoquée par les électrolytes contenus dans l'eau de mer, et ceux-ci restent fixés sur les particules floculées. Contrairement aux deux processus mentionnés précédemment, la présence du salant est ici facilement prévisible et ne peut être une surprise.

Les deux premiers modes d'intervention de la salinisation marine paraissent les plus fréquents et les plus importants, mais dans ces quatre processus, la dominance du chlorure de sodium constitue la caractéristique de la salure d'origine marine actuelle ou récente. Nous verrons qu'il en est différemment de la salure marine ancienne, qui se rattache au processus de salinisation suivant.

V.3 Origine volcanique :

Les manifestations du volcanisme, qui font intervenir des composés du chlore et du soufre, se trouvent surtout parmi les phénomènes posthumes de cette activité, c'est-à-dire les phénomènes qui n'apparaissent qu'après les paroxysmes marqués par les éruptions, et qui dénotent un certain retour au calme. Ces manifestations comprennent essentiellement :

- Les fumerolles de diverses sortes (acides, sèche, etc.), dans lesquelles on constate la présence d'acide chlorhydrique et d'anhydrides sulfureux et sulfhydrique ;
- La présence de gypse et de soufre en abondance dans plusieurs volcans éteints ou en repos, ou à proximité des appareils volcaniques ;
- Enfin les très nombreuses sources thermales, à minéralisation chlorurée ou sulfatée, qui sont généralement localisées dans les régions de volcanisme.

La présence, dans les manifestations posthumes du volcanisme, du chlore et du soufre, également présents dans l'eau de mer, a longtemps incité

les géologues ont penser que les éruptions étaient déclenchées par la pénétration de cette eau jusque dans les couches profondes de la terre , grâce à des fissures :cette idée avait donnée naissance à la théorie aqueuse du volcanisme ,aujourd'hui abandonnée,car elle ne résiste pas un examen critique des faits.

Il était évidemment possible de penser que la salure des sols, ou tout au moins de certains d'entre eux, pouvaient représenter une conséquence du volcanisme. Il suffisait d'admettre qu'au lieu d'être restés localisés à proximité des appareils volcaniques, les processus de salinisation avaient été capables de réaliser une diffusion assez large de la salure.

Ces considérations, basées sur l'observation, ne permettent nullement d'affirmer que les composés du chlore et du soufre d'origine volcanique ne soient nulle part à l'origine de processus de salinisation. Mais nous avons de bonnes raisons de penser que le domaine d'intervention de ces processus reste assez limité, incomparablement plus réduit que celui dans lequel s'exerce la salinisation géologique liée aux terrains sédimentaires paléolagunaires. Il faut noter d'ailleurs que, dans les terrains volcaniques, les fumerolles chlorhydriques sont bien moins fréquentes que les émanations sulfurées. Cependant les roches volcaniques, et notamment les plus récentes , fournissent fréquemment, au cours de leur altération, du carbonate de sodium qui conduit à des phénomènes pédologiques d'alcalinisation. Les sources carbonatées sodiques qui appartiennent aussi aux manifestations posthumes du volcanisme jouent également le même rôle (théorie de KOVDA). A ces processus d'alcalinisation se trouvent souvent liés les sols à carbonates de sodium. Autres types de salinisation :

V.4 Salinisation des lagunes littorales :

Ce type de salinisation reste par certaines conditions sous la dépendance directe de la mer,tandis qu'il se rapproche de la salure d'origine géologique par beaucoup de ses effets,notamment par la nature des évaporites :en somme il fait transition. Les lagunes sont des dépressions dans lesquelles des eaux,originellement plus ou moins salées, se

concentrent par évaporation. Le régime lagunaire s'établit dès que l'évaporation excède l'alimentation en eau, mais en général ce bilan ne peut être fait que d'une façon semestrielle ou annuelle, car le rythme saisonnier est capable de l'inverser momentanément. C'est en somme un régime de marais salant naturel, qui fonctionne d'autant que le climat est plus aride. L'appellation de lagune est généralement réservée aux dépressions littorales (on dit aussi « paralique ») alimentées par la mer, mais elle est parfois appliquée à des dépressions continentales (« limnique ») fournies en eau salée à partir d'affleurements salifères (dépressions du type chott ou sebka), et c'est pourquoi nous avons précisé la distinction car, comme on le verra, elle a son intérêt.

Deux caractéristiques des lagunes littorales doivent être signalées, car elles sont des éléments importants du régime lagunaire :

- ❖ La communication avec la mer est le plus souvent temporaire, mais elle peut être continue à la condition qu'elle le soit d'une façon telle que l'alimentation reste inférieure à l'évaporation, condition qui, en toute circonstance, est indispensable à l'instauration du régime lagunaire ;

- ❖ Les pluies, qui ne modifient nullement le milieu marin, marquent d'une façon caractéristique le milieu lagunaire. Elles interviennent de deux façons. D'une part, elles peuvent provoquer une redissolution des évaporites déjà déposées, et cette redissolution est sélective, car elle s'exerce naturellement sur les sels les plus solubles : par exemple le chlorure de sodium est beaucoup plus vite dissous que le sulfate de calcium. Dans le cas de fortes pluies, il arrive qu'un courant inverse de l'alimentation s'établisse, et qu'une eau salée s'écoule vers la mer. Le deuxième mode d'intervention des pluies est pourtant plus important. Il s'exerce au moyen des eaux de ruissellement qui apportent dans la lagune des sédiments généralement argileux ou limoneux. Ainsi se constituent des couches d'alluvions imperméables, qui recouvrent les évaporites déjà cristallisées et les protègent contre toute redissolution subséquente.

Quand l'eau de mer alimente à nouveau la lagune, le processus de

précipitation des évaporites repart à zéro et produit une nouvelle série verticale de couches salines.

VI. Les causes principales de la salinisation des sols :

VI.1 Accumulation des sels dans le sol

Les principales causes d'accumulation des sels dans le sol sont :

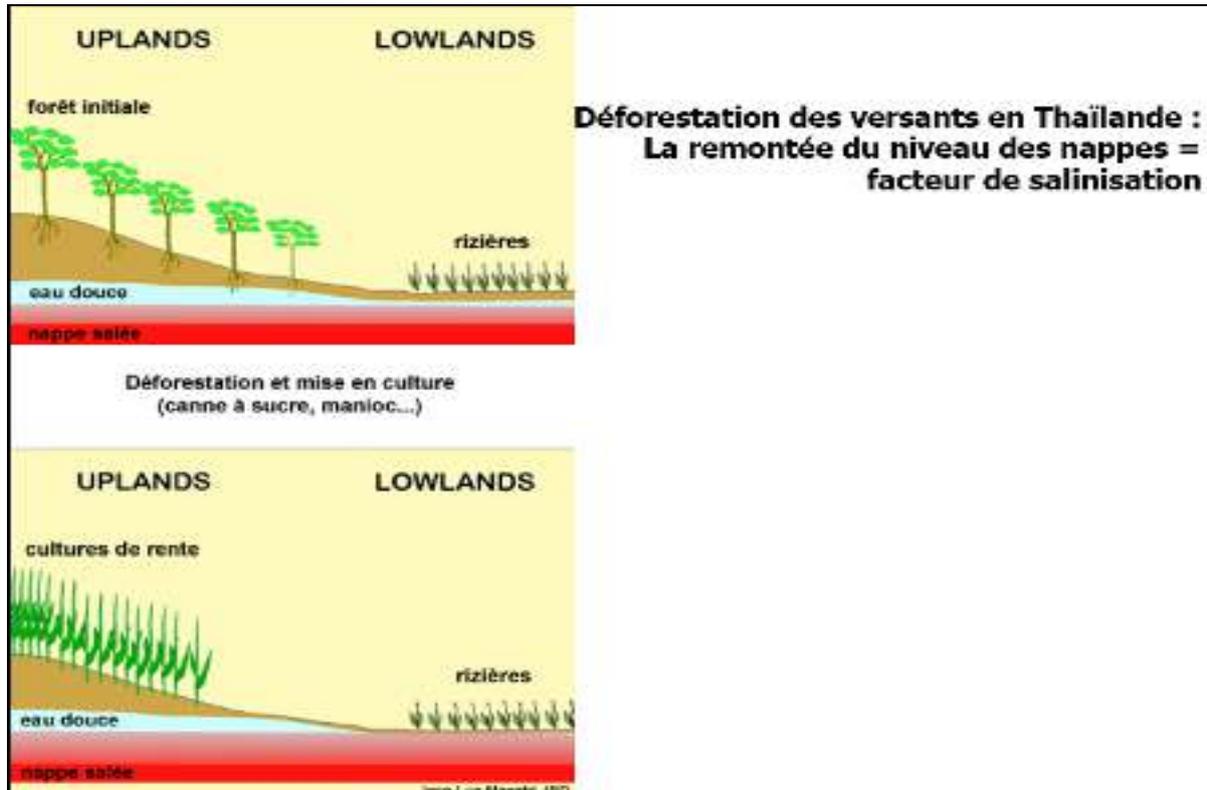
- ❖ Décomposition in situ des roches:
- ❖ Eau de nappe : remontée de la nappe souterraine à proximité de la surface et transport de sels par remontée capillaire.
- ❖ Anthropique: irrigation (utilisation d'une eau d'irrigation de qualité médiocre et lessivage naturel insuffisant).
 - ❖ Un abus de la mécanisation, qui conduit à un compactage du sol et à un faible drainage.
 - ❖ Un lessivage excessif pendant la remise en valeur des terres, sans drainage suffisant.
 - ❖ Des calendriers culturels et des techniques inadaptées.
 - ❖ Des pratiques inadaptées de jachère en saison sèche conjuguées a un niveau élevé de la nappe
 - ❖ Une mauvaise gestion des périmètres d'irrigations
 - ❖ Une contamination chimique, telle celle causée par l'intensification culturelle, qui se traduit par un apport d'engrais minéraux important sur de longues périodes.
- ❖ Eau de surface

L'absence de drainage ne permet pas l'évacuation des eaux excédentaires et l'eau est évaporée par la suite tandis que les sels s'accumulent et précipitent en surface.

L'absence de drainage induit une recharge des nappes phréatiques plus ou moins salées qui alors affleurent et affectent les cultures.

Dans le cas de déforestations, la remontée des nappes phréatiques provoquée crée des affleurements salés dans les points bas du paysage (ex : Thaïlande).

Figure N°4 : Déforestation des versants en Thaïlande



VI.2 Processus de salinisation des sols

Les sols salins normalement existent dans des zones qui reçoivent des sels à partir d'autres lieux ou de l'eau d'irrigation. Le degré avec lequel cette salinisation se produit dépend de la composition de l'eau d'irrigation et aussi du bilan entre l'apport d'eau d'irrigation à la surface du sol et le déplacement de l'eau de drainage de la limite inférieure du profil. Ainsi on peut dire qu'on aura salinisation quand :

$$CE_i * Q_i > CE_d * Q_d$$

avec :

CE_i : conductivité électrique moyenne de l'eau d'irrigation.

Q_i : quantité d'eau d'irrigation.

CE_d : conductivité électrique moyenne de l'eau de drainage.

Q_d : quantité d'eau de drainage

Généralement, on effectue ces calculs pour une période de 1 année. La vitesse de salinisation annuelle peut être exprimée par :

$$\Delta CE_{PS} = \frac{(CE_i * Q_i - CE_d * Q_d)}{Z_{sol} * PS * d_a / 100} = \frac{\text{Quantité de sels apportés} - \text{Quantité de sels drainés}}{\text{Humidité de saturation}}$$

avec :

PS: Humidité du sol au point de saturation (%).

Z_{sol} : profondeur du sol (cm).

d_a: Densité apparente du sol (g/cm³).

On peut dire que pour un apport d'une quantité d'eau (Q_i) ayant une conductivité électrique, CE_i, la vitesse de salinisation est hautement dépendante de la quantité d'eau de drainage déplacée vers le bas du profil (Q_d). Ceci devient clair si on considère les situations où Q_d = 0 (stagnation d'eau superficielle ou présence de couche du sous-sol imperméable) ou Q_d < 0 (remontée capillaire de l'eau). Dans ces cas, la vitesse de salinisation (ΔCE_{PS}) est nettement élevée.

Cette équation montre aussi que CE_d est importante, mais elle ne peut pas être mesurée facilement. De plus, elle augmente au fur et à mesure que la salinisation progresse, car l'eau de drainage peut être considérée, en première approximation, comme la solution du sol à une humidité juste au-dessus de la capacité au champ :

$$CE_d \approx CE_{HCC}$$

Considérant cette égalité valable, la salinisation va atteindre un équilibre aussitôt que :

$$CE_{HCC} \approx CE_d = \frac{Q_i}{Q_d} * CE_i$$

qui provient de la substitution de (2) dans (1) avec $(\Delta CE_{ps}) = 0$. Car à l'équilibre c'est à dire qu'il n'y a pas de salinisation du sol, on a $CE_d * Q_d = Q_i * CE_i$

et la salinité aura atteint un niveau constant de :

$$CE_{ps} = \frac{HCC}{PS} * CE_{HCC} \approx \frac{HCC}{PS} * \frac{Q_i}{Q_d} * CE_i$$

Cette équation peut être utilisée pour calculer la quantité d'eau d'irrigation (Q_d) qu'il faut apporter en plus de l'eau qui sera consommée par la plante ($Q_c - Q_p$) (Q_c : eau consommée et Q_p : précipitations) afin de maintenir la salinité du sol au-dessous d'une conductivité électrique (CE_e) déterminée. Cette CE_e dépend de la tolérance de la culture en question à la salinité. En pratique cette quantité d'eau en excès est souvent exprimée en terme de fraction de la quantité totale d'eau d'irrigation nécessaire et est appelée : Leaching requirement, LR (Besoin en lessivage). Elle est calculée à partir de l'équation 3 :

$$LR = \frac{Q_d}{Q_i} \approx \frac{HCC * CE_i}{PS * CE_{ps}}$$

En supposant une distribution de l'eau d'irrigation sans pertes dues au ruissellement, le besoin en eau est :

$$Q_i = Q_{ET} + Q_d$$

$$Q_i = Q_{ET} + LR \times Q_i$$

$$\text{et donc } Q_i = \frac{Q_{ET}}{1 - LR}$$

La quantité d'eau d'irrigation en excès ne doit pas dépasser la capacité de drainage du sol. Mis à part le problème de disponibilité d'eau à apporter en excès, cette capacité de drainage constitue souvent le facteur limitante à l'apport d'excès d'eau pour deux raisons :

- Faible drainages, du à une couche imperméable dans le profil ou sous-sol : L'amélioration peut être réalisée par des mesures chimiques (gypse par exemple) ou mécaniques (sous-solage).
- Nappe élevée : ce qui va nécessiter un drainage artificiel.

En fonction du temps et de la quantité, les pluies qui contribuent à une percolation profonde de l'eau, peut réduire significativement le besoin en lessivage de l'eau d'irrigation. Puisque les cultures sont sensibles à la salinité du sol plutôt qu'à celle de l'eau d'irrigation, si le sol reçoit de l'eau de pluies supplémentaire pour le lessivage, de l'eau d'irrigation à salinité plus élevée peut être utilisée sans que ça entraîne une perte de production. Pour estimer le besoin en lessivage, on doit connaître la salinité de l'eau d'irrigation (CE_i) et la tolérance de la culture à la salinité (CE_c). La salinité de l'eau peut être obtenue à partir d'analyses au laboratoire et la CE_c peut être estimée à partir de données de tolérance de la culture à la salinité qui sont données par le tableau suivant. Ce tableau donne les niveaux critiques de salinité (CE_c) au dessus de laquelle on risque d'avoir une réduction du rendement.

VI.3 Appréciation du niveau de salinité d'un sol :

- conductivité électrique à 25°C d'un extrait de pâte saturée*.
- alcalinité représentée par le pourcentage de sodium échangeable (ESP) :

$$ESP = \frac{100 \times Na^+}{CEC}$$

Na^+ : quantité d'ions sodium échangeables (me/100g de sol)

CEC : capacité d'échange cationique (me/100g de sol)

VII. Mesure de la salinité des sols :

Il existe plusieurs méthodes de mesure de la salinité, ces méthodes pouvant être de laboratoire ou in situ.

- a. Mesure au laboratoire sur extrait de pâte saturé

b. Mesure in situ sur échantillon dilué**VII.1 Mesure au laboratoire**

♦ La méthode utilisée au laboratoire est celle de la mesure de la salinité sur un extrait de patte saturée. Il est évident que la concentration totale en sels dans un sol est fonction de sa teneur en eau.

Cependant, cette méthode requiert une certaine finesse, car il s'agit d'une opération un peu fastidieuse. C'est pourquoi d'autres techniques ont été proposées, plus rapide et moins fastidieuse : ce sont les extraits dilués.

Les différents facteurs de dilutions utilisés sont :

- ❖ L'extrait 1/1 : on prélève 100 gramme de sol d'eau distillées.
- ❖ L'extrait 1/5 : on prélève 100 gramme de sol d'eau distillées.
- ❖ L'extrait 1/10 : on prélève 100 gramme de sol d'eau distillées.

Il est important de noter que plus la dilution est élevée, plus le travail est facile et plus l'extraction est rapide. Mais les solutions obtenues sont moins représentatives de la solution originale.

VII.2 Mesures in situ :

La méthode de la mesure de la salinité totale au laboratoire étant très longue et nécessitant beaucoup de travail, d'autres méthodes beaucoup plus récentes se faisant in situ ont été proposées. Parmi celles ci on peut citer :

- Le sait sensor ;
 - Les électrodes piquets ;
 - Le salinity probe.
- ❖ Le sait sensor nécessite un temps de réaction trop longue et ne donne pas de très bons résultats, il est alors peu important de le décrire.
 - ❖ Le système à électrodes piquets est identique à celui utilisé en prospections géophysiques sauf qu'en ce qui nous concerne, l'écartement entre les piquets n'est que de quelques dizaines de centimètres. C'est une méthode qui consiste à injecter du courant électrique alternatif ou continu, connaissant la d.d.p (différence de potentielle) entre les électrodes intérieures et l'amperaze du courant

injecte. On calcule la résistance du sol qui est fonction de la concentration en sel de sa solution.

- ❖ Le salinity probe utilise le même principe que le système à électrodes piquets, avec un écartement entre les piquets plus réduit (de quelques cm seulement). L'intérêt de ce procédé est qu'on peut enfoncer les électrodes , à des profondeurs déterminées, dans le sol pour y mesurer la salinité très localement.

IX. Conclusion :

A l'issu de ce travail, un aperçu général a été mis en œuvre en ce qui concerne la salinité dans le monde. Dès lors on se rend compte l'importance de ce phénomène qui pourrait devenir un jour une épidémie si aucune action n'est prise .



CHAPITRE II :
CLASSIFICATION DES SOLS SALES

CHAPITRE II:
CLASSIFICATIONS DES SOLS SALEES :

Introduction :

La classification des sols salés à pour but de connaître le type de classe avant d'entreprendre des mesures préventives ou curatives efficaces.

I. Classification des sols :

Il existe trois (4) types de classification les plus utilisées à l'échelle mondiale :

- La classification Française,
- La classification russe ,
- classification de la FAO,

La classification par rapport à leur teneur en sel.

I.1 La classification Française :

Il existe 3 grands types de sols salés définis selon leur salinité (conductivité électrique) et leur alcalinité (ESP).

C'est ainsi qu'on distingue :

I.1.1 Les sols salins non alcalins :CE>4 mmho/cm et ESP <15%

Ce sont des sols salés qui contiennent de sel soluble en quantité supérieur à la concentration admissible. Ils ont une capacité d'échange inférieure à 15meq/100g .Les sels solubles présent sont principalement des sels neutres tel que :NaCL, NaSO4, CaSO4.

Dans ces sols du fait de la faible capacité d'échange (taux d'argile très faible),le mauvais développement de la plante est due au fait d'une forte concentration dans la solution en sel soluble,ce qui entraîne une augmentation de la pression osmotique qui ne permet plus à la plante de s'alimenter. Ces types de sols ont une bonne structure et peuvent avoir parfois une fertilité physique meilleure que celle des sols équivalents non salés. Ce sont des sols pauvres en Na mais riche en sel blancs (chlorures, bicarbonate de calcium ou de magnésium,les sulfates etc.).

Généralement à l'état floculé on peut les récupérer par un lessivage efficace. Leur pH varie entre 8 et 8,5 le plus souvent.

I.1.2 Les sols alcalins non salin : $CE < 4$ mmho/cm et $ESP > 15\%$

Ce sont des sols qui ont de mauvaises propriétés physiques. Leur récupération est délicate et nécessite une combinaison d'amendement, de lessivage et un choix judicieux des cultures à mettre en place. Le pH dans ce type de sols est en général supérieur à 8,5 voire 10 parfois.

I.1.3 Les sols alcalins et salin : $CE > 4$ mmho/cm et $ESP > 15\%$

Ce sont des sols qui contiennent en quantité importante des sels solubles et avec une dominance de l'ion sodium donc le taux de Na^+ est $> 10\%$ de la capacité d'échange. Ils sont assez difficile à récupérer car bien que comportant une forte proportion de sels solubles, un simple lessivage pourrait les transformer en sol alcalins, dégradant ainsi leurs propriétés physiques. Le pH est inférieur à 8,5. on peut résumer tout ceci dans le tableau ci-dessous :

Tableau N°3 : recapitulatif

	CE à 25°C (mS · cm⁻¹)	ESP
Sols salins¹	> 4	< 15
Sols alcalins (sodiques)²	< 4	> 15
Sols alcalino-salins³	> 4	> 15

I.2 La classification russe :

C'est la classification la plus connue. Cette classification comporte 3 grandes catégories :

- Les solontchaks ;
- Les solonetz ;
- Les solods.

I.2.1 Les Solontchaks :

(Qui correspond au sol salin alcalin qui varie entre 15 à 20 mètres en Algérie). Ce sont des sols salins qui contiennent de larges quantités de sels solubles toxiques sur les 30 premiers centimètres de l'horizon superficiel et qui décroît en profondeur. Sur ce type de sols, aucune récolte n'est en principe possible. Il n'y pousse que quelques halophytes adaptées aux conditions salines.

On distingue divers types de solontchaks :

les " actifs" (contemporains) caractérisés le plus souvent par la présence d'une nappe à moins de 2 à 3 mètres de profondeur. Les "secs" (plus anciens) caractérisés par une nappe située à plus de 20 à 25 mètres de profondeur.

Il existe entre autre :

- ❖ Les solontchaks chlorureux avec 40% de chlore
- ❖ Les solontchaks sulfatés moins 10% de chlore
- ❖ Les solontchaks chlorureux sulfatés taux de chlore varie entre 10 à 23%
- ❖ Les solontchaks sulfato-chlorureux le taux de chlore varie entre 23-40%.

I.2.2 Les solonetz :

Ce sont des sols alcalins(lourds) le taux de Na^+ est supérieure à 10%. Il y'a aussi des sols magnésiques dans les solonetz dont le taux Mg^+ est supérieure à 15%.

C'est un nom donné à un groupe de sols alcalins caractéristiques des steppes et des régions arides et désertiques. Ils sont caractérisés par un ESP très élevé car ne contenant pas beaucoup de sels solubles autres que NaCl. Ce sont donc des sols qui présentent de mauvaises caractéristiques physiques car on connaît l'effet des ions Na^+ sur les propriétés des sols.

I.2.3 Les solods :

Ce sont des sols très lessivés presque impropres pour l'agriculture.

Nous avons 2 ions ;

SO42- ion très mobile.

CL- ion qui peut être absorbé (moins mobile que SO42-).

I.3 La classification de la FAO :

C'est une classification des sols salés qui tient compte de la tolérance des cultures. En irrigation, cette classification est très importante, car permettant de choisir les cultures à mettre en place sur tel type de sol en fonction de sa salinité. Cependant, elle présente l'inconvénient de prendre en considération la concentration totale en sels du sol, sans se préoccuper de la nature des ions en solution (effets de toxicité). Les différentes classes sont répertoriées dans le tableau suivant:

Tableau N°4: classification des sols salés et leurs effets sur les cultures

classes de sols salés	Conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (dS/m)	Effets sur les cultures
Non salés	0 - 2	Effets de la salinité négligeables
Faiblement salés	2 - 4	Les cultures sensibles sont à éviter
Sols salés	4 - 8	Les cultures semi- tolérantes peuvent être pratiquées
Sols très salés	8 - 16	Seules les plantes tolérantes peuvent être cultivées
Sols extrêmement salés	16	Quelques rares cultures extrêmement tolérantes peuvent pousser

- Tableau de distribution mondiale (FAO) des sols affectés par la salinité (**voir annexe N°1**)

I.4 Classification par rapport à leur teneur en sels :

La concentration totale des résidus sec doit être <2-3% (total des sels).

Si le profil est varié on doit faire la moyenne pondérée.

*la concentration en chlore admissible $<0,01-0,02\%$ /[] global dans le résidu sec

* $[\text{SO}_4^{2-}]_{\text{adm}} < 0,2\% * [\text{totale}]_{\text{adm}} < 5\text{g/l}$. Classification par rapport à la conductivité électrique (mesure de sel par rapport au déplacement)

La conductivité électrique (CE) à 25°C est défini par :

$\text{CE} < 4 \text{ mmho/cm}$ sol non salé.

$4 < \text{CE} < 8 \text{ mmho/cm}$ sol salé

$8 < \text{CE} < 20 \text{ mmho/cm}$ salinité moyenne

$20 < \text{CE} < 80 \text{ mmho/cm}$ forte salinité

$\text{CE} > 80 \text{ mmho/cm}$ très forte salinité

Classification des eaux des nappes phréatiques en g/L .

Profil de la nappe $< 3\text{m}$

$\text{CE}_{\text{NP}} < 2\text{g/l}$ non salé

$2\text{g/l} < \text{CE}_{\text{NP}} < 4\text{g/l}$ faiblement salé

$4\text{g/l} < \text{CE}_{\text{NP}} < 8\text{g/l}$ moyennement salé

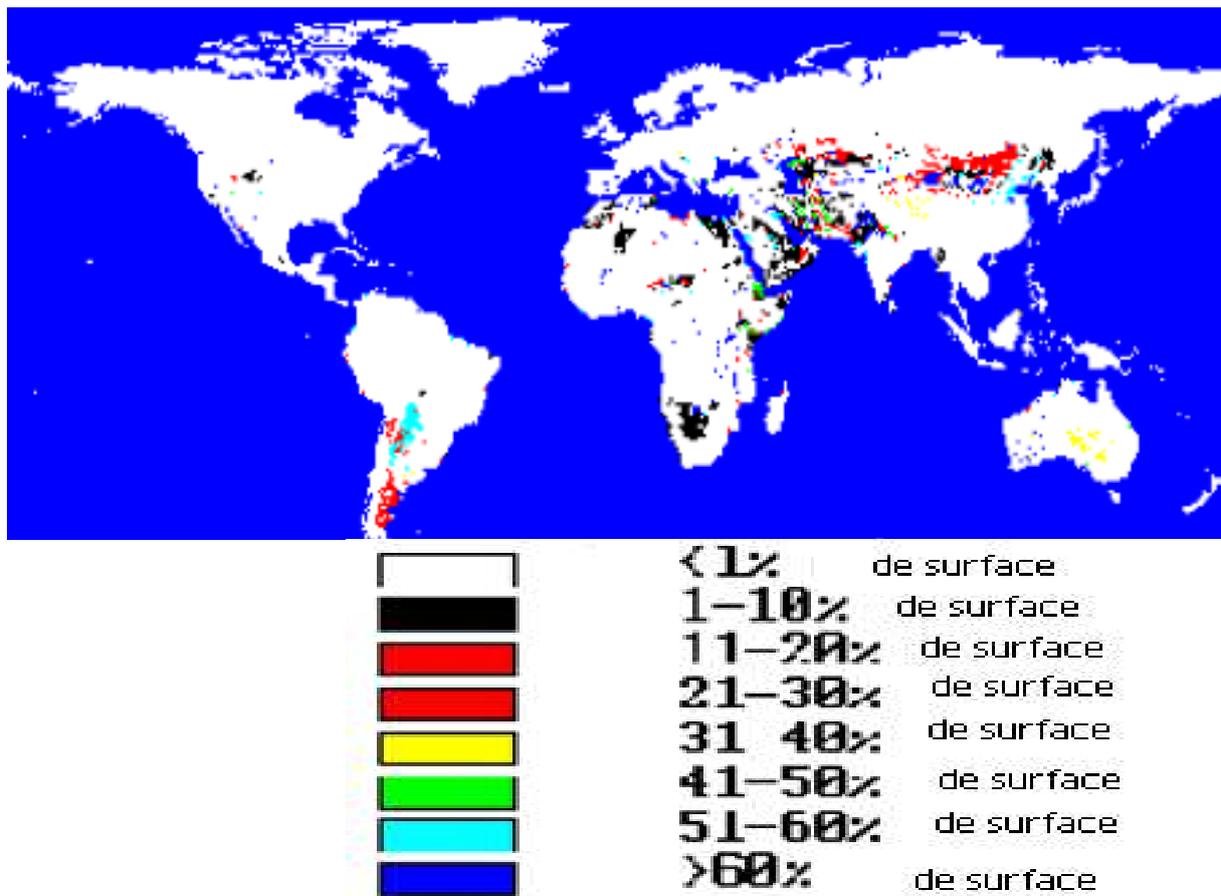
$8\text{g/l} < \text{CE}_{\text{NP}} < 10\text{g/l}$ fortement salé

Sur les terrains salés pour éviter une salinisation future de la nappe phréatique lorsque sa concentration dépasse 2g/l doit être maintenue à une profondeur admissible qui limitera l'évaporation de la surface de la nappe cause d'une accumulation de sel dans la couche active. Ces profondeurs sont appelées profondeurs critiques et doit être égale entre 2 à 2,5 m.

II. carte de situation des sols

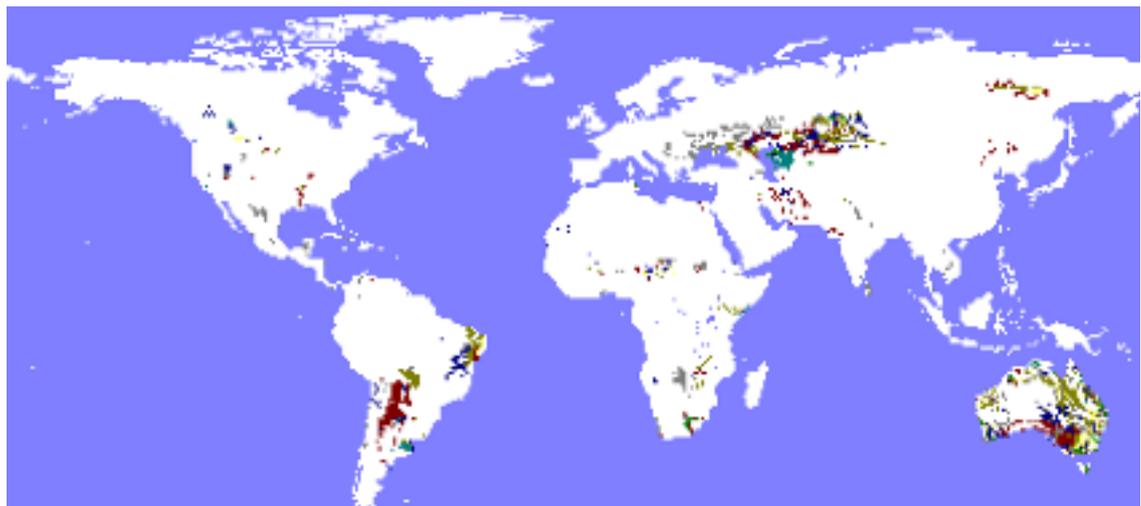
II.1 Des sols salins dans le Monde :

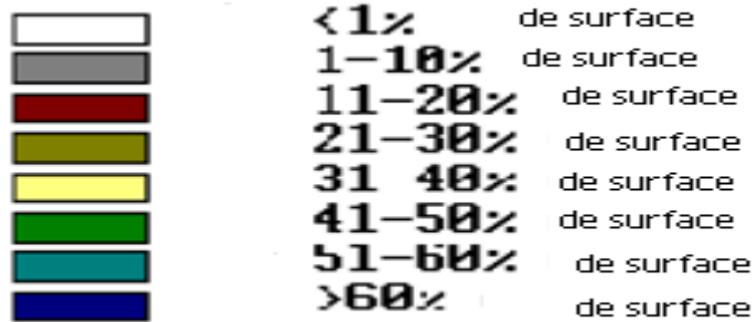
Figure N°5 : carte des sols salins dans le monde



II.2 Sols alcalins

Figure N°6: carte des sols alcalins dans le monde





Source Handicaps international 2001

III. Conclusion :

A l'issu de ce travail nous avons pu remarquer qu'il existe plusieurs classifications des sols salés qui ont tous pour objectif de classer les sols selon leur degré d'affectation par la salure. En ceux qui concernent les cartes ci dessus elle nous montre l'importance de ce travail. La plus part des terres du monde sont affectées par ce problème de salinité coïncidant avec les zones a faible pluviométrie.



CHAPITRE III:

QUALITE DES EAUX EN IRRIGATIONS

CHAPITRE III :**Qualité des eaux en irrigation****I. Historique**

La plupart des problèmes qui se développent en agriculture irriguée proviennent de la composition chimique de l'eau d'irrigation. L'utilisation de types variés d'eaux pour l'irrigation, aussi bien que la nécessité de prédire les problèmes qui peuvent se développer quand différentes eaux d'irrigation sont utilisées, ont créé le besoin pour un système de classification de la qualité de l'eau qui est complètement différent des systèmes utilisés pour l'industrie, la vie aquatique et la santé, etc. Plusieurs schémas ont été proposés pour classer les eaux par rapport à leur qualité pour l'irrigation. Ils ont varié de schémas mis au point pour des conditions d'utilisation moyennes (US Salinity Laboratory, 1954 et Ayers and Westcott, 1976) à des classifications spécifiques basées sur une culture donnée dans une région spécifique (Thorn and Peterson, 1954 et Carter, 1969). L'eau n'a pas de qualité inhérente en soi excepté dans le contexte pour lequel elle est utilisée. Sa qualité dépend de ce qui peut être fait avec elle sous des conditions spécifiques d'utilisation. Ces conditions spécifiques incluent la tolérance à la salinité de la culture utilisée, de différentes propriétés physiques et chimiques du sol, et des pratiques de l'irrigation, spécialement le leaching fraction (LF), fréquence d'irrigation et les conditions climatiques de la région. Les critères pour évaluer la qualité de l'eau d'irrigation doivent inclure tous ces facteurs et devraient être évalués sur la base du danger potentiel que présente l'eau à créer des conditions dangereuses à la croissance et à leur utilisation. Le problème est tellement complexe que ce n'est pas étonnant qu'aucun schéma complet universel de classification de l'eau d'irrigation n'ait encore été développé. Un tel objectif peut paraître être non réalisable et même non réaliste. Récemment, il a été reconnu que l'interaction entre des propriétés physico-chimiques du sol et l'eau d'irrigation est un paramètre

très important dans l'évaluation de la qualité de l'eau pour l'irrigation. Cet aspect est l'objet de ce texte.

II. QUALITE DES EAUX EN IRRIGATION

Elle est définie par quatre (4) paramètres :

- ❖ La salinité
- ❖ La toxicité
- ❖ L'incidence sur les propriétés physiques du sol
- ❖ L'exigence particulière de chaque culture.

II.1 La salinité :

- ❖ Elle représente :
- ❖ -la concentration globale
- ❖ -la concentration de chaque élément.

Elle est exprimée par la conductivité électrique CE (mmhos / cm) ou en ds/m ou en g/l.

Les sels les plus solubles sont : Cl^- ; SO_4^{2-} ; Na^+ ; Mg^{2+} et Ca^{2+}

II.2 La toxicité :

Elle tient compte de la teneur de certains éléments (le bore, les nitrates ,le chlore, le sodium etc.). Parmi ces éléments certaines sont nuisibles pour les plantes.

Evaluation du problème de toxicité :

Pour évaluer une toxicité potentielle, il faut faire une analyse de l'eau portant sur le bore, le sodium, le chlore, le calcium etc.

II.3 Incidence sur les propriétés physiques du sol :

Les éléments affectant les propriétés physiques du sol telles que :

- ✓ La perméabilité
- ✓ Le rendement
- ✓ Les façons culturales difficiles ainsi que les modalités d'applications de l'eau d'irrigation

La réduction de la perméabilité est généralement associée à une eau de forte teneur en Na, en Ca et en Mg. Ce cas est surtout considérée lorsque le sol à mettre en valeur renferme beaucoup de particules fines c'est-à-dire une capacité d'échange > 10 à 15 méq /100g de terre sèche.

en analysant les critères de qualité des eaux d'irrigations peut dire que :
« Il semble impossible d'établir des normes précises concernant les critères de qualité d'eau d'irrigation à usage universel. La qualité d'une eau d'irrigation doit être évaluée en fonction des conditions spécifiques dans lesquelles elle est utilisée c'est à dire la nature des cultures, le type de sol , les modes d'irrigations , les pratiques culturales et les conditions climatiques. En raison de toutes ces réserves les classifications existantes doivent être utilisées comme indicateurs et être vérifiées en fonction des conditions locales d'utilisation ».

La concentration admise de sels solubles dans l'eau d'irrigation dépend beaucoup de facteurs et en partie de la composition chimique du sol, du drainage du sol (naturel ou artificiel), procédés d'irrigations, des propriétés physiques et hydriques du sol, de la salure du sol, des exigences particulières des assolements ; c'est pourquoi il ne peut y avoir une méthode universelle pour évaluer la qualité de telle ou telle eau en irrigation.

III. CARACTERISATION DES EAUX D'IRRIGATIONS :

La convenance d'une eau d'irrigation pour l'irrigation est jugée selon certains éléments qui caractérisent celle-ci du point de vue qualité. Ces éléments qui permettent aussi de classer les eaux d'irrigations sont :

- ❖ La quantité totale de sels dissous dans l'eau
- ❖ La proportion de sodium par rapport aux autres cations (risque D'alcalinisation).
- ❖ Les anions associés
- ❖ La présence éventuelle d'éléments toxiques dans une eau.

Ainsi, la quantification de chacun de ces éléments pour une eau donnée ,devra permettre de dégager les dangers et les limites de son utilisation.

III.1 Définition de la salinité d'une eau :

La salinité d'une eau est un terme utilisé pour faire référence à la concentration totale d'ions inorganiques majeurs (Na, Ca, Mg, K, HCO₃⁻, SO₄⁻ et Cl⁻) dissous dans cette eau. Elle exprime la concentration totale des cations ou anions en solution et non la somme des concentrations de ces cations et anions.

Pour des raisons de commodité analytique,un indice pratique de salinité électrique Ce exprimée en decisiemens par mètre (ds/m) ou en mmhos/cm.Une relation approximative a été établie entre la concentration totale en sels de ces solutions et leurs conductibilité (c'est-à-dire la plus ou moins qui facilite le passage du courant électrique).

Afin de permettre la comparaison de la qualité des eaux de différentes origines et sous des conditions climatiques diverses, la conductivité électrique est toujours déterminée à une température standard de 25°C.

III.2 Mesure de la salinité d'une eau :

La mesure de la salinité d'une eau se fait comme celle d'un extrait saturé à l'aide d'un conductimètre. Cependant plus une eau est salée, plus la relation liant sa concentration totale en sels et sa conductivité électrique devienne fausse. Mais, malgré ces défauts, cette méthode répond parfaitement au but fixé en raison de sa rapidité d'exécution et sa fidélité.

IV. CLASSIFICATION DES EAUX D'IRRIGATIONS :

Les eaux d'irrigations, en fonction des dangers que peuvent entraîner leur utilisation, sont réparties en plusieurs classes. Plusieurs auteurs s'étant intéressés de très près à la qualité des eaux d'irrigations ont proposé différentes classes d'eau salée.

IV.1 Classification mondiale de la FAO (g/l)

Pour CE égal ou compris entre :

1g/l	bonne pour l'irrigation
1g/l-3g/l	faiblement salée
3g/l-5g/l	moyennement salée
5g/l-10g/l	fortement salée
>10 g/l	extrêmement salée

Si le sol et l'eau d'irrigation sont pauvres en calcium (Ca), une alcalinisation du sol peut se produire du fait de l'absorption de Na⁺ par le complexe absorbant du sol surtout dans les proportions dépassant 3-1 g/l.

Généralement au delà de 1 g/l il est nécessaire d'avoir un bon drainage du sol, un régime de lessivage et une technique élevée des travaux agrotechniques du sol.

IV.2 Classification Américaine :

IV.2.1 Classification USSL (United States Salinity Laboratory) :

C'est la classification la plus utilisée en ce qui concerne l'irrigation. Proposée par le laboratoire de Riverside (RICHARDS 1954) voir (**Annexe N° 2**), elle est basée essentiellement sur 2 paramètres :

Selon la salinité et le risque d'alcalinisation des eaux pouvant être destinées à l'irrigation. C'est-à-dire :

- ✚ Concentration électrique exprimée en CE (mmhos/cm) ;
- ✚ Le SAR (% de Na échangeable).

IV.2.1.1 Classification selon la salinité de l'eau CE :

Selon la salinité de l'eau, exprimée par sa conductivité électrique CE_{25°C}, On distingue cinq(5) classes.

❖ Classe C1 : CE_{25°C} < 0,25 mmhos/cm

Eau de faible salinité utilisable pour irriguer la plupart des cultures sur la plupart des sols sans grand risque de salinisation du sol.

Cependant un léger lessivage est nécessaire pour plus de sécurité, surtout sur les sols très peu perméables.

❖ **Classe C2 :CE25°C compris entre 0,25 et 0,75 mmhos/cm.**

Eaux de salinité moyenne qualifiées de peu dangereuses si elles sont utilisées avec un léger lessivage pour les plantes modérément tolérantes aux sels.

❖ **Classe C3 :CE25°C compris entre 0,75 et 2,25 mmhos/cm ;**

Eaux dont la salinité est qualifiées de forte, inutilisables pour les sols à drainage restreint. Même avec un bon drainage, des pratiques spéciales de contrôles de salinité nécessaires et les plantes ayant une bonne tolérance aux sels peuvent pousser.

❖ **Classe C4 : CE25°C entre 2,25 et 5 mmhos/cm**

Eaux de salinité très forte, normalement inutilisables pour l'irrigation. Exceptionnellement, elles peuvent être utilisées sur des sols très perméables avec un lessivage intense. Les plantes très tolérantes aux sels pourront être cultivées.

❖ **Classe C5 :CE25°C >5 mmhos/cm**

Eaux inutilisables en irrigation sauf sur des sables lessivés et drainés, avec des cultures extrêmement tolérantes par exemple le palmier Dattier.

IV.2.1.2 Classification selon le risque d'alcalinisation SAR :

Le risque d'alcalinisation d'un sol par l'eau d'irrigation est apprécié selon le sodium absorbable par ce sol. Ainsi, selon le taux absorbable de sodium (SAR) d'irrigation, on distingue quatre (4) classes.

❖ **Classe S1 :**

La quantité de sodium est faible. De telles eaux peuvent être utilisables pour l'irrigation de presque tous les types de sols sans danger d'alcalinisation. Cependant, certaines cultures sensibles au sodium sont à éviter (certains arbres fruitiers, avocatier).

❖ **Classe S2 :**

La quantité de sodium est qualifiée de moyenne. Le danger d'alcalinisation du sol est appréciable dans les sols à texture fine et à forte capacité d'échange, surtout dans des conditions de faibles lessivage. Ces eaux peuvent poser des problèmes sur le plan structural du sol à moins que du gypse soit présent en quantité suffisante au niveau de ce dernier. Elles sont utilisables sur les sols à texture grossière ou les sols organiques ayant une bonne perméabilité.

❖ **Classe S3 :**

La quantité de sodium dans ces eaux est qualifiée d'élevée. Elles sont à employer avec prudence. Sinon de graves difficultés peuvent apparaître sur la plupart des sols

❖ **Classe S4 :**

De telles eaux sont qualifiées d'impropres à l'irrigation, sauf si sa salinité est très faible et si on ajoute du gypse ou autre source de Ca soluble pour améliorer le bilan ionique.

IV.2.2 Classification de Christiansen et al. (1977) :

C'est une classification fondée sur sept (7) critères :

- La conductivité électrique
- Le pourcentage en sodium
- Le SAR
- La teneur en NaCO_3
- La teneur en Cl^-
- La salinité effective : C_e
- La teneur en bore.

Les différentes classes sont représentées dans le tableau ci-dessous

Tableau N°5 : Classification de Christiansen.

classe	Conductivité électrique en mmhos/cm	Na en %	SAR	NaCO ₃ en méq/l	Cl- en méq/l	Es en méq /l	Bore en ppm
1	0,5	40	3	0,5	3	4	0,5
2	1	60	6	1,0	6	8	1,0
3	2	70	10	2,0	10	16	2,0
4	3	80	12	3,0	15	24	3,0
5	4	90	15	4,0	20	32	4,0
6	valeurs supérieures aux limites de 5						

IV.2.3 Classification des sols en Algérie selon DURAND :

D'après DURAND " Sols Irrigables (1958) " beaucoup d'eaux d'irrigation utilisées en Algérie seraient impropres d'après la classification Américaine, hors l'utilisation de cette eau donne de très bonnes récoltes. Il s'en suit que les normes Américaines sont trop sévères.

D'autres éléments peuvent intervenir dans la qualité des eaux d'irrigations ,tels que :

-le sol

-la tolérance des cultures pratiquées.

DURAND propose cinq (5) classes (pour les sols en Algérie).

- ❖ $CE < 0,25$ mmhos/cm : propre à l'irrigation
- ❖ $0,25 \text{ mmhos/cm} < CE < 0,75$ mmhos /cm : salinité moyenne
- ❖ $0,75 \text{ mmhos/cm} < CE < 2,25$ mmhos/cm : salinité forte
- ❖ $2,25 \text{ mmhos/cm} < CE < 5$ mmhos/cm : salinité très forte
- ❖ $5 \text{ mmhos/cm} < CE < 20$ mmhos/cm : salinité excessive.
- ❖ Le SAR qui caractérise la qualité de l'eau d'irrigation .

Tableau : Limites d'emploi des eaux salines pour les différentes classes de textures des sols d'après Durand(1955) (voir annexe N°3)

Classification de l'eau d'irrigation basée sur la concentration totale en sels, selon différentes sources.

Tableau N°6 Classification de l'eau d'irrigation basée sur la concentration totale en sels, selon différentes sources.				
Classe de salinité	US Salinity Laboratory de Riverside (1954)	Thorn and Peterson (1954)	Carter (1969)	Ayers and Westcot (1976)
	CE (dS/m)	CE (dS/m)	CE (dS/m)	CE (dS/m)
C1	0.1-0.25	<0.25	<0.4	<0.75
C2	0.25-0.75	0.25-0.75	0.4-1.2	0.75-1
C3	0.75-2.25	0.75-2.25	1.2-2.25	1.5-3.0
C4	>2.25	2.5-4.0	2.25-4.0	>3.0
C5		4.0-6.0		

C1: satisfaisante pour toutes les cultures exceptées les cultures très sensibles.

C2: Généralement satisfaisante bien que quelques cultures sensibles seront affectées.

C3: Satisfaisante pour la plupart des grandes cultures, mais des conditions de salinité vont se développer si le lessivage et le drainage ne sont pas adéquats.

C4: Normalement non recommandée sauf si des cultures tolérantes sont cultivées. Le lessivage et le drainage sont impératifs.

Ces types de classification sont rigides et dans plusieurs cas, elles ne tiennent pas compte des facteurs spécifiques qui sont importants pour la détermination de l'utilisation potentielle d'une eau donnée. La tolérance des plantes aux sels est un exemple pour lequel une classification rigide ne peut pas être correcte. Ainsi l'évaluation de la qualité d'une eau d'irrigation doit

être faite en relation avec trois aspects; la tolérance de la culture à la salinité, combien de lessivage sera réalisé et quel est le niveau de salinité qui sera obtenu quand un certain type d'eau d'irrigation est utilisé.

V. Risque et Mesure de l'alcalinité :

Il fait référence à la proportion de sodium par rapport aux autres cations (particulièrement Ca^{++} et Mg^{++}) en solution. Comme pour les sols, le terme qu'on utilise pour évaluer ce paramètre est le SAR ou l'ESP, ces deux termes étant liés :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (\text{USDA.1954})$$

Avec Na^+ , Ca^{++} et Mg^{++} les concentrations respectives des ions Na, Ca et Mg dans l'eau d'irrigation.

Cependant, ce paramètre a été jugé insuffisant et on a proposé un autre terme pour caractériser le danger d'alcalinité ; ce terme est :

" Adjust SAR" = $SAR_{\text{ajusté}}$.

=coefficient ajusté d'absorption du sodium.

Au départ, ce $SAR_{\text{ajusté}}$ provient de la recherche d'un index permettant d'estimer la tendance à la précipitation ou à la dissolution du $CaCO_3^{++}$.

EN 1936 Langelier avait proposé l'index : $[pH_a - pH_c]$

Avec : pH_a le pH de l'eau du sol

$$\text{Et } pH_c = \left[(pK_2' - pK_c') + (P_{Ca} + P_{alk}) \right]$$

Avec pK_2' : le logarithme négatif de la 2ème constante de dissociation de H_2CO_3 .

pK_c' : le produit de solubilité de $CaCO_3$.

P_{Ca} : le logarithme négatif de la concentration en calcium dans l'eau d'irrigation.

P_{alk} : le logarithme négatif de la concentration en $(CO_3^{2-} + HCO_3^{-})$ dans l'eau d'irrigation.

Une valeur positive de l'index indiquait une tendance à la précipitation du $CaCO_3$;

Une valeur négative indiquerait au contraire une tendance à la dissolution du $CaCO_3$ par l'eau appliquée au sol.

L'index a été modifié par BOUWER, (1968) qui a ajouté le Mg^{++} au Ca^{++} dans P_{Ca} . Finalement, on a abouti au $SAR_{adjusté}$ dont l'expression est :

$$SAR_{Adjusté} = SAR_{normal} [1 + (8,4 - pH_c)]$$

Avec 8,4 : est le pH théorique supposé d'un sol en équilibre avec son $CaCO_3$ solide.

pH_c : est le pH théorique d'une eau d'irrigation en équilibre avec de la calcite (une des formes les plus courantes de $CaCO_3$ solide).

❖ Si $pH_c > 8,4$

Alors :

- $SAR_{adjusté} < SAR_{normal}$
- L'eau a tendance à dissoudre le $CaCO_3$

❖ Si $pH_c < 8,4$

Alors :

- $SAR_{adjusté} > SAR_{normal}$
- L'eau a tendance à précipiter le $CaCO_3$

Le pH_c se calcule par :

$$pH_c = (pK_2' - pK_c') + p(Ca + Mg) + P_{alk}$$

$$pK_2' - pK_c' = 2,0269 + 0,5092 \times \frac{4 \times \sqrt{\mu}}{1 + 2 \times \sqrt{\mu}} + \frac{\sqrt{\mu}}{1 + 1,45 \times \sqrt{\mu}}$$

avec

$$\mu = \frac{1}{1000} \times (1,3477 \times C + 0,5355)$$

avec

$$C = [Ca^{++} + Mg^{++} + Na^{++}]$$

Pour faciliter les calculs, il existe des tables proposées par Ayers (1976).

Tableau N°8 : Table pour le calcul des valeurs du pH_c d'une eau d'après Ayers 1976 (voir Annexe N° 4)

$$ESP = \frac{Na_{adsorbé}}{T}$$

T : c'est la quantité de cations adsorbés.

Il n'existe pas une mesure directe de l'alcalinité car celle-ci ne dépend pas simplement de la quantité de sodium présente dans la solution d'un sol, on utilise souvent un paramètre appelé ESP (Exchange sodium percentage).

L'ESP est le rapport entre la quantité de sodium adsorbé et la quantité totale de cations adsorbés. (il est important de remarquer que ce rapport concerne le complexe adsorbant). Il exprime donc la teneur en sodium échangeable sur le complexe adsorbant.

Cependant la détermination de l'ESP est une opération très laborieuse et lente, pour cela donc il faut déterminer :

- Le sodium total
- Le sodium en solution
- Le sodium adsorbé (par différence)

– La capacité d'échange cationique (CEC)

En moyenne , on dit que si que le SAR dépasse 6 à 9, on peut s'attendre à des effets sur la structure du sol (donc la perméabilité et l'aération) et ce d'autant plus que le sol est argileux.

Cependant ,il a été mis en évidence que l'effet du sodium est fortement dépendant de la présence des ions carbonates (CO_3^- et HCO_3^-) qui mobilise le calcium

($CaCO_3$ $Ca(HCO_3)_2$). Il a donc été proposé d autres paramètres qui traduit le risque d'alcalinisation que pourrait causer une eau d'irrigation sur ce plan tout en tenant compte de l'influence des ions carbonates.

Un des paramètres les plus utilisés a été le :

RSC :résiduel sodium carbonate

$$RSC = (HCO_3^- + CO_3^-) - (Ca^{++} + Mg^{++})$$

Les concentrations étant exprimée en meq/l.

++ : A titre de point de repère , on peut dire que 1,5mmho/cm à 25°C correspond à peu près à 1g/l.

Si le RSC < 1.25, l'eau peut être utilisée pour l'irrigation

Si le RSC > 1.25 l'eau n'est pas appropriée à l'irrigation

Tableau N° 7:Risque des bicarbonates pour l'eau d'irrigation

Risques des Bicarbonates (HCO_3) pour l'eau d'irrigation (meq/L)			
	Nul	Léger à Modéré	Sévère
(meq/L)	<1.5	1.5-7.5	>7.5
RSC	<1.25	1.25 to 2.5	>2.5

Il est évident que plus le RSC est élevé, plus l'eau est dangereuse .

Selon la F.A.O (1984), la limite de classe pour le taux de sodium échangeable est comme suit :

- ESP < 5% légère alcalinité
- 5% < ESP < 20% alcalinité modérée
- 20% < ESP < 45% alcalinité grave
- ESP > 45% alcalinité très grave

Figure N°11 : Abaque donnant L'ESP en fonction du SAR

(voir Annexe N°5)

Il existe aussi des Relations empiriques reliant ces termes :

United states salinity laboratory (1954)

$$ESP = \frac{100 \times (-0.0125 + 0.01475 \times SAR)}{1 + (-0.0126 + 0.01475 \times SAR)}$$

$$ESP = 0,988 \times SAR - 0,61 \quad (\text{CRUESI-1969})$$

$$ESP = 1,049 \times SAR - 0,381 \quad (\text{SERVENT-1974})$$

Une dernière relation assez proche des autres a été calculée pour des sols du périmètre du Haut Cheliff par DJABRI-1980

$$ESP = 1,02 \times SAR + 1,071 \quad (\text{DJABRI-1980})$$

Ces relations ne sont applicables que dans le contexte où elles ont été déterminées.

V.1 Conséquence de l'alcalinisation :

L'alcalinisation du profil est accompagnée d'effet particulièrement défavorables sur les propriétés physico-chimiques du profil. L'humus, aussi bien que les argiles sodiques, se dispersent de sorte que la structure en agrégats est détruite et remplacée par une structure fondue, " asphyxiante ". Si les argiles sont des montmorillonites sodiques, soumises à des variations de volume considérables suivant les saisons humides ou sèches (phénomènes de fentes de retrait). Elle vont engendrer la formation d'une

structure prismatique à fissuration verticale ; en outre, en milieu très alcalin, la cristallinité des argiles diminue, une partie se dégrade et s'amorphise ce qui accentue l'évolution défavorable de la structure qui prend un aspect colonnaire (DUCHAUFFOUR , 1983).

VI. Risque de toxicité particulière :

Ces risques de toxicité particulière concernent essentiellement les plantes .Il s'agit de risques liés à la présence des ions Na^+ , Cl^- , mais aussi du bore ou du zinc. Pour les eaux chargées en Na^+ et Cl^- , on distingue l'aspersion des autres techniques d'irrigations. L'aspersion du feuillage d'une culture provoque après évaporation une accumulation de sel qui peut aboutir à une absorption excessive de ce sel par les feuilles. Cela peut provoquer des brûlures et à la limite, la défoliation. Certaines cultures les agrumes par exemple, sont très sensibles à ces phénomènes. On ne connaît pas exactement les valeurs limites de tolérance, mais on sait que les cultures, déjà sensible au Na^+ et Cl^- , le sont davantage si la technique est l'aspersion. Pour atténuer ce problème, on peut recommander d'irriguer (par aspersion) en continu ou à vitesse accélérée ou de nuit.

Les paramètres permettant de caractériser une eau d'irrigation étant définis, il convient donc de distinguer les différents types d'eaux salées vis-à-vis des risques (déjà) qu'elles peuvent causer .Cependant, un paramètre important pour la prédiction du danger de sodicité par rapport à la est la combinaison de la concentration en électrolytes de l'eau d'irrigation et l'ESP du sol. L'effet de la concentration en électrolyte sur la perméabilité du sol a été étudiée par Quirk et Schofield. Ils ont proposé le concept de "concentration critique" qui est la concentration à laquelle, pour un ESP donné, la perméabilité est réduite de 10-15% .

Remarque :

La classification des eaux en irrigation d'après l'USSL ne tient pas compte des risques de toxicité. Elle doit donc être accompagnée de classifications d'après les risques de toxicité de certains ions.

En général elle se base sur le SAR ajusté. L'ancienne équation du SAR ne tient pas compte des réserves de Ca^{2+} de l'eau d'irrigation et dans la solution du sol, en conséquence, elle surestime le danger d'alcalinisation. L'effet complémentaire de Ca^{2+} de l'eau d'irrigation est pris en considération par la formule du SAR* (SAR ajusté).

Tableau N°8 : Classes s'eaux d'irrigation d'après leur teneur en bore et tolérantes relative des cultures.

classe	Teneur en bore (mg / l)		
	Culture sensibles	Cultures semi-tolérantes	<i>Cultures tolérantes</i>
1	< 0,33	< 0,67	<1
2	0,33 à 0,67	0,67 à 1,33	1 à 2
3	0,67 à 1	1,33 à 2	2 à 3
4	1 à 1,25	2 à 2,25	3 à 3,75
5	> 3,75	> 2,25	> 3,75

VI.1 Guide général pour la caractérisation d'une eau d'irrigation :

Il s'agit d'un tableau N°12 (voir annexe N°6) de synthèse permettant de se repérer pour l'appréciation de la qualité d'une eau d'irrigation. Les valeurs proposées ne constituent bien sûr que des points de repères.

Le tableau distingue trois qualitatifs : pas de problèmes, problèmes croissants et problèmes graves.

Si l'on tombe dans la colonne « pas de problèmes », cela signifie que l'utilisation de cette eau ne devrait poser aucun problème pédologique ou agronomie : si les autres conditions sont réunies, les cultures devraient assurer leur plein potentiel de production.

Si l'on tombe dans « graves problèmes », alors l'utilisation de cette eau entraînera des problèmes pédologique ou agronomiques.

Entre les deux extrêmes, toute la gamme des nuances intermédiaires est possible.

VII. Qualité de l'eau et technique d'irrigation :

Le choix de la technique d'irrigation est conditionnée par la contrainte de la qualité des eaux d'irrigations. Par exemple l'aspersion ne peut en aucun cas être utilisée lorsqu'il y'a une concentration élevée en chlore (Cl), en sodium (Na) et en Bore (Br) parce que ces éléments sont toxiques pour les plantes , c'est-à-dire les feuilles absorbent l'eau contenant ces éléments ce qui provoque la brûlure des feuilles).

VII.1 Méthodes d'irrigation

Les méthodes d'irrigation doivent avoir pour objectif d'économiser l'eau au maximum. En matière d'irrigation, les systèmes ne sont généralement pas conçus pour cette économie d'eau dans des zones où pourtant cette ressource est limitée. Le plus souvent, l'eau est donnée sans compter et la terre en reçoit une quantité excessive et en particulier lorsque le coût de l'eau n'est pas en relation avec son coût réel.

En irrigation, le mieux est de donner juste ce qu'il faut, c'est - à - dire une quantité d'eau calculée pour répondre de manière satisfaisante aux besoins des cultures et prévenir l'accumulation des sels dans le sol. Des irrigations plus fréquentes, en gardant un taux d'humidité du sol plus important, évitent d'avoir une pression osmotique élevée et la concentration des sels dans la solution du sol reste donc minimale. Appliquer trop peu d'eau serait du gaspillage car elle ne serait pas en quantité suffisante pour subvenir aux

besoins des cultures et ne produira pas l'effet escompté. A l'inverse, des quantités excessives pourraient également avoir comme effet de saturer le sol pendant trop longtemps, inhiber son aération, lessiver les nutriments, accroître l'évaporation et la salinisation et enfin porter le niveau de la nappe phréatique à un niveau supprimant l'activité racinaire et microbienne normale et qui ne peut être par la suite lessivé et drainé qu'à grand frais. Les méthodes classiques d'irrigation par surverse consistent à inonder le sol jusqu'à une certaine profondeur de façon à le saturer complètement puis à attendre quelques jours ou semaines jusqu'à ce qu'il soit complètement asséché avant de réinonder la terre. Dans ce système, basé sur l'application peu fréquente d'un important volume d'eau sur l'ensemble de la surface agricole, la terre traverse plusieurs cycles caractéristiques, consistant en une alternance de période où l'humidité du sol est excessive et de périodes où la teneur en eau est généralement insuffisante. Les conditions ne sont idéales que lors d'une brève période de transition (ce qui est le cas pour les cultures de décrue). Dans les systèmes, plus récent, consistant à déverser de quantités d'eau plus limitées, à des intervalles fréquents et là où sont concentré les racines, le but est de réduire les fluctuations d'eau dans la rhizosphère en maintenant en permanence le sol humide, sans le saturer et en évitant que la culture soit privé d'oxygène (par excès d'eau) ou soumise à un stress hydrique (par manque d'eau). De plus, l'application d'eau de façon localisée permet qu'une partie de la surface reste sèche permettant de réduire l'évaporation mais aussi la prolifération des adventices.

Un des autres avantages de ce type d'irrigation est que des petites disparités de planage dans la surface du sol ne seront plus aussi importantes par rapport à une irrigation par surverse et ne causeront pas d'application d'eau et donc de lessivage des sols hétérogène.

Pour bien faire, l'eau devrait être amenée jusqu'au champ dans des canaux étanches pour éviter les pertes par infiltration ou de préférence dans des

conduits fermés qui évitent la pollution et permettent de pressuriser l'eau distribuée.

VII.1.1 Irrigation par raie et la salinisation :

Avec le système traditionnel d'irrigation de surface à la raie, l'accumulation des sels s'effectue au niveau des billons. En effet l'alimentation en eau des plantes se faisant latéralement des raies vers les billons, après évaporation et extraction racinaire, les sels contenus dans l'eau d'irrigation s'accumulent au niveau des billons. Pour lessiver ses sels accumulés au niveau des billons, on utilise généralement un système d'irrigation à la planche ou par submersion, après chaque campagne d'irrigation

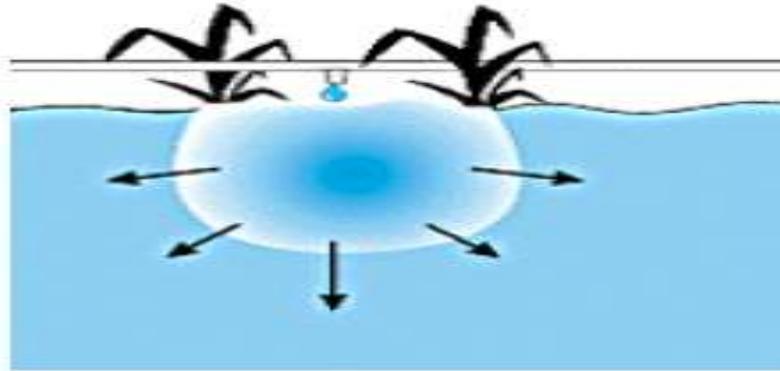
Figure N°7 : schéma de l'irrigation par raie



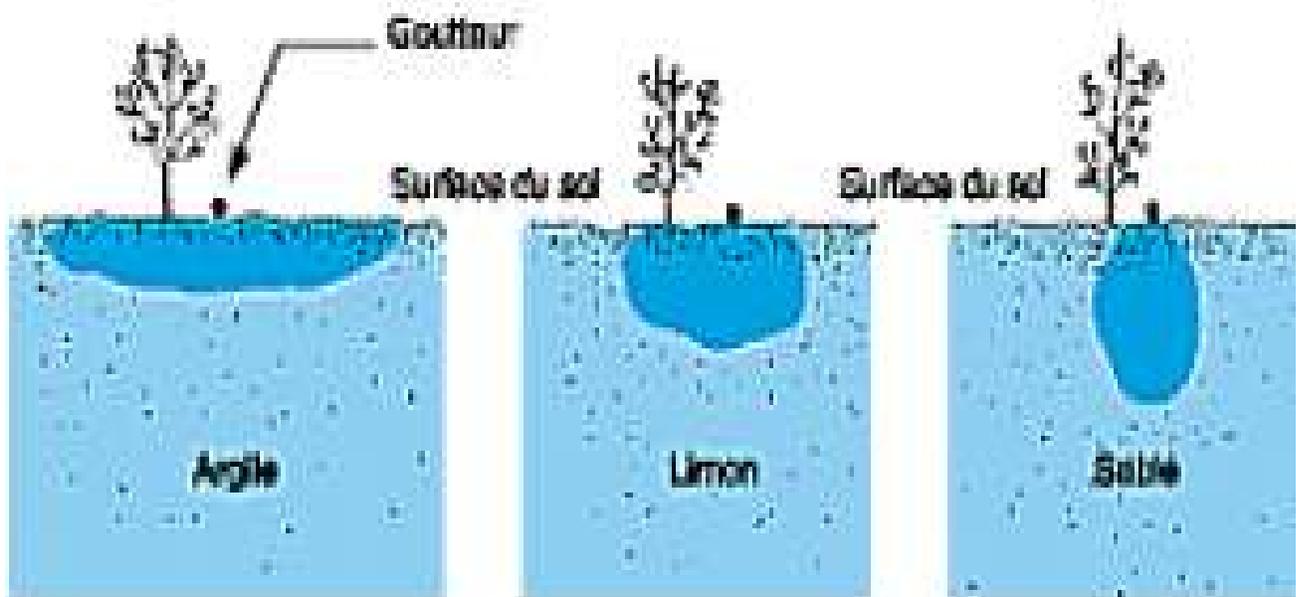
VII.1.2 Système complet de goutte - à - goutte:

On appelle irrigation au goutte - à - goutte l'application lente et localisée d'eau au niveau d'un point ou d'une grille de points sur la surface du sol. Ce type d'irrigation est utilisé à grande échelle en Israël où il a été mis au point et amélioré régulièrement. Il peut être appliqué sur tout type de cultures mais il se prête moins bien aux cultures de plein champ plantées serrées nécessitant un mouillage uniforme de tout le volume de sol.

Figure N°8 : schéma du système goutte à goutte



Forme du mouillage du sol sous un goutteur placé entre 2 rangs peu espacés. Lorsque les applications au goutte - à - goutte sont fréquentes, la portion du sol mouillée reste en permanence humide et reste donc bien aéré. Ce type d'irrigation présente un avantage certain par rapport à l'irrigation par surverse et même par rapport à l'irrigation par aspersion pour les sols sableux ayant une capacité de rétention faible et dans les climats arides où les pertes évaporation sont élevées.

Figure N°9 : Schémas de la diffusion de l'humidité dans des sols

Ce système permet également d'utiliser de l'eau légèrement saumâtre (de l'ordre de 1 000 à 2 000 mg/l) car elle ne rentre pas directement en contact

avec le feuillage qui risque donc moins d'être grillé par le sel. De plus comme dans la zone mouillée le sol reste en permanence humide, les sels ne se concentrent pas et la salinité de la solution du sol dans la rhizosphère n'est que légèrement supérieure à celle de l'eau. L'application de fertilisant directement dans l'eau d'irrigation est également rendue possible (fertigation). Cependant si l'eau d'irrigation est saumâtre, une fraction des sels transportés par l'eau tend à se concentrer à la périphérie des cercles mouillés et à former des anneaux de sels visibles autour de chaque point de gouttage. Si les pluies saisonnières ne sont pas suffisantes pour lessiver ces sels, il sera alors nécessaire de lessiver les sols chaque année. L'un des autres avantages de l'irrigation par goutte – à – goutte, est que les racines des plantes tendent à se rassembler de préférence près des goutteurs et à éviter ainsi les sels s'accumulant à la limite de la zone mouillée. Le désavantage d'un tel système reste son coût, principalement lors de l'investissement de départ. De plus, même si les besoins en main d'oeuvre diminuent, ce système requiert une surveillance très régulière par des techniciens qualifiés. En irrigation localisée, du fait qu'on ramène l'eau juste au niveau de la zone racinaire des plantes, il se crée alors un bulbe humide autour de cette zone, où la plante puise l'eau dont elle a besoin. Après plusieurs irrigations, les sels contenus dans l'eau d'irrigation s'accumulent autour de bulbe entourant les racines des plantes.

VII.1.3 Irrigation par asperseur (sprinkler irrigation) :

Cette méthode consiste à déverser l'eau en jets plus ou moins fins sous forme de pluie artificiel. Ce système permet d'augmenter la surface arrosée et le volume de sol mouillé dans lequel les racines des plantes absorbent l'eau et les éléments nutritifs. De plus, c'est un bon moyen de contrôle de la quantité d'eau apportée. La tendance est pourtant d'appliquer trop peu d'eau par cette méthode et le lessivage des sels doit souvent être fait avec un effort particulier. En terrain sableux, on veillera cependant à ne pas apporter

de quantités trop importantes d'eau par cette méthode car le lessivage des éléments de base (azote, phosphore, potassium) pourrait alors être trop important. De plus, en cas d'utilisation d'eau saline, les plantes sensibles aux sels devraient pouvoir être aspergées durant la nuit afin d'éviter l'effet de concentration des sels à la surface des feuilles, tout en veillant à multiplier les applications afin que l'absorption foliaire soit diminuée. Le lessivage des sels solubles est également plus efficace lorsque les taux d'infiltration d'eau sont moins importants que la capacité d'infiltration des sols, condition qui ne peut être obtenue par l'irrigation par surverse. Influence du système d'irrigation sur la configuration de la salinité des sols et rendement du poivron, à deux niveaux de salinité.

Ce schéma indique également qu'une irrigation par aspersion sera moins efficace pour lutter contre la salinité.

VII.2 L'irrigation et quelques uns de ses effets possibles :

Nous savons que l'extension contemporaine des zones salées a souvent été favorisée par une pratique incorrecte de l'irrigation. Toute eau d'irrigation contient des sels solubles et constitue une source potentielle de contamination. Lorsqu'on observe les résultats obtenus sur des périmètres irrigués un peu partout dans le monde, on observe des paradoxes du moins en apparence. Par exemple, il est courant dans certaines régions (Afrique du Nord, Italie, Israël...) d'irriguer avec des eaux très salées (jusqu'à 7 gr/l) sur sols légers sans causer de salinisation ou de détérioration du sol ; par contre, on peut citer d'autres exemples :(Irak, Inde, Pakistan ,Iran, et Asie centrale) où l'utilisation d'eaux relativement « fraîches » (peu salée) a créé de très fortes salinisation des sols. On peut ainsi relever des paradoxes apparents très déroutants. Pourtant ces paradoxes s'expliquent facilement en relevant quelques uns des effets possibles d'une irrigation.

1. l'application d'une eau d'irrigation provoque une dilution de la solution

de l'eau du sol. On peut extraire au laboratoire, à l'aide d'un appareil à pression ou par substitution à l'alcool, la solution de l'eau d'un sol. De nombreux travaux ont ainsi montré que la concentration en sels de telles solutions est généralement supérieure à la concentration que l'on peut rencontrer dans la plupart des eaux utilisées pour l'irrigations. Donc l'irrigation, même avec une eau relativement salée provoque une dilution, parfois considérable, de la solution de l'eau du sol. Même l'eau de mer, à la limite, utilisée sur un solonchak (sol très contaminé) peut provoquer une diminution (temporaire ou moins) de la concentration en sels. Ceci pour montrer que l'utilisation d'une eau relativement salée est envisageable et que les problèmes principaux seront :

- ❖ d'évacuer les sels après évaporation de l'eau
- ❖ de maintenir en permanence un taux de dilution suffisant

si ces deux problèmes ne sont pas résolus, l'utilisation d'eau salée peut aboutir à une salinisation brutale du sol avec forte réduction de sa fertilité. Si, au contraire, un taux de dilution suffisant est maintenu et si les sels apportés sont évacués (par lessivage et drainage), on peut très bien imaginer l'utilisation d'eau très salées sans problèmes majeurs et avec des rendements encore très appréciables.

2. l'application d'une eau d'irrigation riche en Na^+ et CO_3^- , HCO_3^- peut favoriser l'accroissement (parfois brutal) du ESP du complexe argilo-humique ; et ce par substitution du Ca^{++} par les carbonates. Ainsi, une eau peu salée mais alcaline peut provoquer une alcalinisation lorsqu'elle est appliquée sur un sol relativement argileux. Avec pour conséquence classique : la destruction à terme de la structure du sol, donc la réduction très nette de sa fertilité physique. Par contre une eau un peu salée peut avoir un effet bénéfique lorsqu'elle est appliquée sur un sol alcalin.

3. il a existé et il existe toujours de nombreux systèmes, réseau d'irrigation anciens, mal conçus, vieux, défectueux etc. ... avec
- des canaux primaires, secondaires mal équipés rendant impossible une distribution correcte de l'eau ;
 - des canaux en terre non revêtus, constituant de véritables passoires
 - une irrigation par voie gravitaire sur des terrains à micro-relief mal préparé ;
 - des irrigants mal préparés, à faible niveau technique, connaissant mal ou pas du tout les besoins en eau des cultures etc....

toutes ces « imperfections » aboutissent au fait que la plupart du temps, on surirrigue les cultures : c'est-à-dire qu'à chaque irrigation un fort pourcentage d'eau percole en profondeur et ne sert pas à la culture.

Ces fortes percolations peuvent avoir des conséquences très néfastes : elles peuvent recharger des nappes phréatiques. Si ces nappes sont peu ou mal drainées, elles s'élèvent et apparaissent en surface ou à proximité dans les zones basses du paysage. Les risques de salinisation par voie secondaire sont alors très élevés.

Dans certains cas, le drainage naturel paraissant suffisant, on ne fait pas très attention et pourtant le phénomène peut se produire simplement, il " prend son temps " : on cite ainsi des exemples en Asie du sud et en Irak où des nappes ont connu un exhaussement de plusieurs dizaines de mètres sur plusieurs dizaines d'années, pour venir finalement engorger et saliniser les sols.

4. on peut citer aussi des exemples de régions, irriguées apparemment correctement, avec grande efficacité et avec une eau de bonne qualité, qui ont été malgré tout salinisées par l'irrigation. Simplement par accumulation directe du sel due à une sous irrigation permanente et un manque d'eau de

pluie (aucun lessivage donc). Le processus pouvant ici aussi s'étaler sur un temps très long.

Ces remarques ainsi énumérer permettent également de mettre en évidence que la qualité d'une eau d'irrigation ne pourra constituer un critère absolu pour l'estimation du risque du fait de son utilisation.

La qualité d'une eau sera donc différemment interprétable suivant :

- Le type de sol
- Le type d'irrigation et le niveau technique
- Le type de culture
- Les conditions de drainage
- Les conditions climatiques (importances des pluies, aridité u climat etc...)

VIII. UTILISATION DES EAUX SALEES EN IRRIGATION

VIII.1 Comment utiliser une eau salée en irrigation

A part les effets du sodium sur les sols, la salinité d'une eau d'irrigation n'a pratiquement d'effets que sur les plantes. On doit donc étudier toutes les éventualités qui permettent d'avoir de bons rendements agricoles avec l'utilisation d'eaux salées.

La première mesure consiste à ne pas utiliser directement des eaux trop salées pour arroser des cultures. Pour cela, quand on dispose d'une source d'eau de salinité importante, en la mélangeant avec une eau de salinité moindre, sa concentration totale en sels sera réduite et son utilisation rendue meilleure. Ainsi l'utilisation des eaux qualifiées de non conventionnelles (eaux saumâtres, eaux de drainage, eaux usées épurées...) est rendu possible en les mélangeant avec des fresh waters (eau de bonne qualité du point de vue salinité). Cette pratique permet non seulement d'augmenter les ressources en eau, mais aussi d'utiliser des eaux de qualités acceptables pour les plantes.

D'autre part, la tolérance des plantes à la salinité dépendant du cycle végétatif de celles ci, une autre pratique consiste à irriguer avec des eaux de faible salinité pendant les périodes où la plante est plus sensible à la salinité (germination, floraison...) et à réserver les eaux salées pour les autres périodes où cette sensibilité est moins importante.

VIII.2 QUELQUES EXEMPLES D'UTILISATION D'EAUX SALEES DANS LE MONDE :

Un peu partout dans le monde, l'utilisation des eaux salées en irrigation est pratiquée avec succès. En effet avec un choix judicieux des cultures à pratiquer, des eaux souvent qualifiées de trop salines sont utilisées avec d'assez bons rendements. Une révision sélectionnée de quelques exemples représentatifs de l'usage d'eaux salines sous différentes circonstances (climat, types de sols, types de culture, mode d'irrigation...), nous conduit aux Etats-Unis, en Israël, en Tunisie, en Inde en Egypte...

VIII.2.1 Utilisation d'eaux salées aux Etats-Unis :

Aux USA des eaux salines ont été utilisées pour l'irrigation depuis 75 à 100 ans dans plusieurs régions du sud ouest, y compris la vallée de la rivière Arkansas au Colorado, celles de la rivière d'Arizona, du Rio Grande et du Pecos, avec succès. Les principales cultures pratiquées sont le coton, la betterave à sucre et la luzerne, avec des pertes de rendements minimales. Les systèmes d'irrigation utilisés sont généralement des systèmes d'irrigation de surface et particulièrement l'irrigation à la raie.

VIII.2.2 Utilisation d'eaux salées en Israël :

Un usage considérable d'eaux salines en irrigation a été fait en Israël où la majorité des eaux souterraines ont une salinité entre 2 et 8 mmhos/cm. D'après les recommandations israéliennes, les sols de texture moyenne peuvent être irrigués avec toute eau saline dans la gamme de tolérance des plantes à la salinité et les sols lourds avec des eaux de salinité comprise entre 3.5 à 5.5 mmhos/cm. Des quantités supplémentaires d'eau de 25 à 30%

étant apportées pour satisfaire besoins de lessivage. Des amendements annuels de gypses sont entrepris pour traiter les sols vaseux en argile quand la SAR des eaux d'irrigation est trop élevée.

VIII.2.3 Utilisation d'eaux salées en Tunisie :

Le gouvernement tunisien a créé en 1962, avec l'assistance des fonds spéciaux des Nations Unies et l'UNESCO, un centre de la recherche pour l'Utilisation d'eaux salines en irrigation (C.R.U.E.S.I.). Les travaux effectués par ce centre rapporte que la salinité des eaux d'irrigation n'est pas une barrière insurmontable. Les eaux étudiées ont une salinité comprise entre 2000 et 6500 ml et un SAR relativement bas (habituellement moins que 10). Les systèmes d'irrigation expérimentés étaient surtout des irrigations de surface et les types de sols généralement variés. Ces expériences réalisées par le C.R.U.E.S.I. ont aboutit à de bons rendements agricoles, tout en ne posant pas de problèmes particuliers au niveau des sols irrigués dont la composition chimique devenait stable au bout de 4 années approximativement. Ces exemples cités parmi tant d'autres montrent qu'aujourd'hui, l'utilisation d'eaux salines en irrigation a atteint des proportions importantes un peu partout dans le monde. Il est devenu même une stratégie dans la gestion des ressources en eau et la volonté d'atteindre l'autosuffisance en agriculture pour bon nombre de pays.

IX. Utilisation des eaux usées (REU) a des fins agricoles :

Notion sur la réutilisation des eaux usées (épurées) : La réutilisation des eaux usées connaît un essor énorme dans ces dernières années, pratique très répandue dans les régions du monde affectées par une pénurie d'eau. La motivation principale de la REU est :

- La réalisation d'économie d'eau et une croissance de la ressource
- La protection de l'environnement.

La REU d'une collectivité à des fins agricoles consiste à récupérer les eaux d'égout après qu'elle est été traité dans une station d'épuration, à les stocker et à les utiliser pour irriguer les cultures où bien arrosé les espaces vert où des terrains de golf.

IX.1 Techniques de la réutilisation des eaux usées :

Une irrigation des cultures où des espaces verts qui met en œuvre des eaux usées n'est pas une irrigation facile, en fait ces eaux véhiculent des micro-organismes et des pollutions qui posent des problèmes de santé public, de conservation du sol et de la protection de l'environnement qui ne doit pas être exagérer. Les eaux usées brutes ne doit pas être directement utilisé, un traitement est toujours nécessaire différant selon le type de culture et le mode d'irrigation choisie. Ces objectifs est de permettre le fonctionnement de l'irrigation en supprimant notamment le risque de colmatage, éviter les mauvaises odeurs et surtout chaque fois que cela est nécessaire d'éliminer les micro-organismes pathogènes. Une installation des eaux usées comporte toujours un stockage il y'a trois raisons pour cela :

- La première ,est que le rythme de production des eaux usées n'est pas raccordé à celui de l'irrigation.
- La deuxième,est qu'il n'y a pas de pire catastrophe pour un périmètre irrigué que l'interruption de l'approvisionnement de l'eau, donc un réserve de sécurité est indispensable .
- Et enfin, La troisième est que on sait maintenant que le stockage

qui soit effectuer sous la forme de recharge des nappes par bassin d'infiltration où dans une réservoir non couvert participant à l'amélioration de la qualité de l'eau.

La réutilisation des eaux usées participe a la salinisation des sols, puisqu'on estime que la concentration en sel de l'eau usée excède celle potable.

L'eau usée contient des éléments qui participent à la salinisation des sols, des éléments toxiques surtout si les effluents sont issus des rejets industriels mais aussi des éléments fertilisants qui entrent dans l'amélioration des rendements des cultures ainsi qu'à la structure du sol.

X. Conclusion :

La qualité de l'eau est très importante en irrigation puisqu'elle participe au développement de la plante mais elle peut être source de salinisation secondaire. En plus le degré de salinisation de l'eau conditionne la technique d'irrigation. Dans ce chapitre nous avons vu différents types de classification de l'eau qui diffèrent d'un lieu à un autre et de ces auteurs, c'est pour dire que la classification n'est pas universelle.



CHAPITRE IV:
EFFET DE LA SALINITE

Chapitre IV :
Effet de la salinité :

La salinisation entraîne:

- Un accroissement de la pression osmotique qui rend l'eau plus difficilement mobilisable par les plantes;
- Une toxicité de certains ions pour les végétaux (Cl⁻, Na⁺, etc.);
- Une dégradation du sol (modifications de l'état structural, diminution de la conductivité hydraulique, etc.)..

Irriguer avec de l'eau chargée en sels réduit la faculté des racines des plantes à puiser de l'eau du sol. Entre 2 irrigations, alors que l'humidité du sol diminue, les sels de la solution du sol peuvent se concentrer à hauteur de 2 à 5 fois leur valeur initiale. Ceci cause une augmentation de la pression osmotique de la solution du sol et rend encore plus difficile pour les racines d'extraire l'eau du sol. C'est ce qu'on appelle une sécheresse physiologique. Les croissances médiocres dues à l'irrigation avec des eaux salées sont généralement provoquées par ce phénomène de stress osmotique causé par la concentration totale des sels plutôt qu'à cause d'ions particuliers.

Il existe deux effets de la salinité :

- ❖ L'effet sur la plante
- ❖ Et l'effet sur le sol

I. Effets de la salinité sur les plantes :

Généralement, l'accumulation de sels dans les tissus de plantes au-dessus de la normale va causer une certaine inhibition de la création et du rendement. Les effets de la salinité peuvent être :

1. Réduction générale de la croissance
 2. Réduction de la croissance causée par une nutrition déséquilibrée en éléments essentiels.
 2. Réduction de la croissance causée par des ions toxiques (Bore).
Mais il n'y pas de limites entre ces différents effets. La suppression de la croissance peut être le résultat d'effet combinés. On a aussi :
- ❖ Trois effets combinés qui affectent la physiologie des plantes :

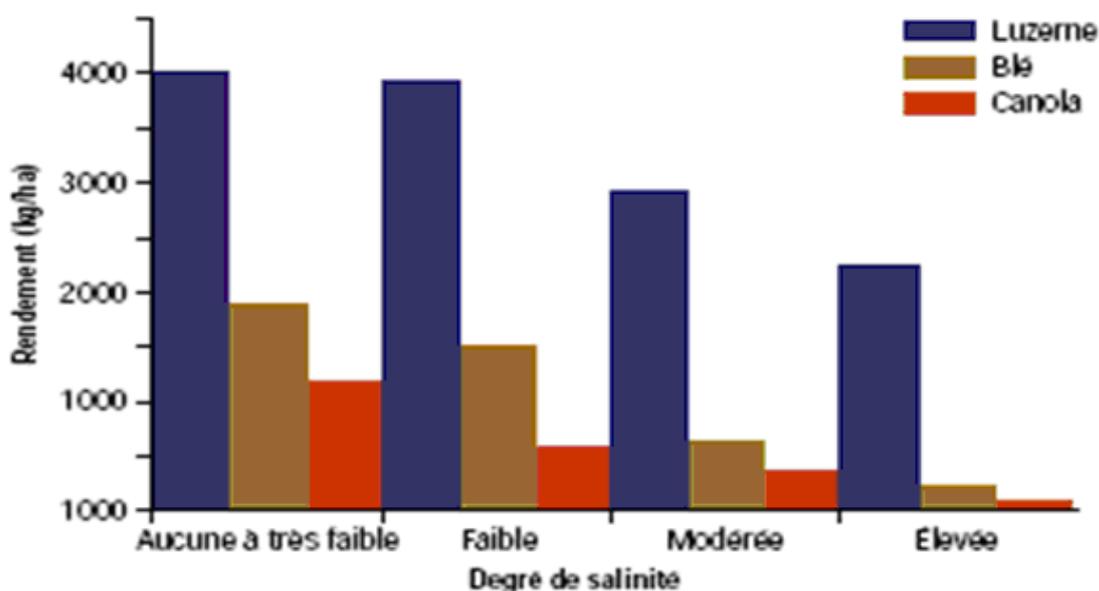
- La salinité (pression osmotique)
- La concentration en ion Na⁺
- La concentration en ion Cl⁻
 - ❖ Les halophytes sont naturellement adaptées aux environnements salés.

Notons que la réaction des plantes face à ces phénomènes peut être fortement liée :

- ✚ à l'espèce
- ✚ au sein de l'espèce, à la variété
- ✚ au stade de développement
- ✚ au type de sol.

Résistance de grandes cultures à une salinité modérée

Figure N°10: effet de la salinité du sol sur le rendement des récoltes



Source: Eilers et al., 1995

I.1. Toxicité d'ions particuliers :

Des concentrations excessives d'ions chlorures et sodium dans l'eau d'irrigation peuvent causer une toxicité dans la plante. Ces ions peuvent être absorbés soit par les racines soit par contact direct avec les feuilles. Si l'eau d'irrigation a une salinité proche de concentrations critiques, il sera nécessaire d'en doser précisément les concentrations en ions

chlorites et sodium. Quelques ions causent des symptômes visibles liés à l'accumulation de ces ions dans la plante et qui ne sont pas liés nécessairement à une réduction générale de la croissance ou au déséquilibre ionique"Macro-ions : C'est pour ça que quelques fois on a besoin de la CE et de la concentration en chlore.

❖ Absorption par les racines:

Les ions chlorites peuvent être absorbés par les racines et s'accumuler dans les feuilles. Dès lors ces ions peuvent provoquer une brûlure des extrémités ou des bords des feuilles, le « bronzage » et le jaunissement prématuré des feuilles. Des analyses chimiques du sol ou des feuilles peuvent être menées pour confirmer une probable toxicité aux ions chlorites. En général, la plupart des plantes boisées (arbres fruitiers à noyaux, citrus, avocatier) sont sensibles à ces ions alors que la majorité des légumes, plantes fourragères et fibreuses y sont moins sensibles . De plus, au sein d'une même espèce, les différentes variétés varient très largement dans leur tolérance aux ions chlorites et sodium.

Le sodium dans l'eau d'irrigation peut également causer des dégâts directs par leur absorption racinaire. Les symptômes de toxicités typiques aux ions sodium sont des brûlures de feuilles, le dessèchement et la mort des tissus sur les bords externes des feuilles contrairement aux symptômes causés par des ions chlorites qui apparaissent normalement à l'extrême pointe des feuilles. De hautes concentrations en ions sodium dans l'eau d'irrigation peuvent aussi causer des déficiences en ions calcium et potassium (par des phénomènes de blocages) dans les sols déjà déficitaires de ces éléments. On peut noter également que la présence excessive d'ions sodique, chlorique et borique peut provoquer une augmentation du pH du sol ce qui a un effet indirect sur l'impossibilité d'absorption des ions ferreux, phosphate, zinc et manganèse indispensable pour la croissance des plantes.

❖ Absorption par les feuilles:

Quelques cultures n'étant pas sensibles à l'absorption directe et excessive par les racines d'ions sodium et chlorures peuvent développer des symptômes de brûlure des feuilles lorsqu'elles sont arrosées avec des eaux salées. Les dommages dus au sel de cette manière ne font que brûler ou tuer les feuilles en contact direct avec la solution salée. Les dommages sont plus importants lorsque l'irrigation se produit par temps chaud et sec et que l'évaporation concentre les sels à la surface des feuilles. Malgré cela, les facultés de résistance des plantes aux sels sont nombreuses et encore mal comprises mais sont apparemment liées à l'une ou l'autre (ou les 2) de ces adaptations : la capacité de la plante à restreindre l'entrée de sels par les racines, la capacité de la plante à tolérer ou s'adapter aux sels une fois entrés dans la plante.

II. EFFETS DES SELS SUR LE SOL:

Les sels exercent sur les cultures des effets spécifiques (par rapport à chaque ion), mais aussi des effets combinés relatifs à la salinité totale des cations et anions en solution dans l'eau d'irrigation. En outre, les sels affectent certaines propriétés physico-chimiques du sol qui à leur tour peuvent avoir des conséquences néfastes sur la croissance des plantes. L'impérativité de développer des critères appropriées pour juger la convenance d'une eau saline à l'irrigation et la nécessité de contrôler l'évolution de la salinité des sols, exigent de connaître comment les sels affectent les sols et les plantes. Ce chapitre donne un aperçu sur les divers effets des sels, qui devront être pris en considération dans le choix des sols et des plantes par rapport à la qualité de l'eau d'irrigation.

Effets spécifiques des sels sur la plante et/ou sur le sol. Chaque ion peut influencer d'une manière spécifique sur les propriétés du sol et sur le développement de la plante. Les différents ions présents dans la solution du sol et leurs effets possibles sur le sol et sur les plantes.

II.1 Effets spécifiques des ions :

On sait que l'action nocive des sels n'est pas toujours proportionnelle à la grandeur de la pression osmotique. Certains ions peuvent exercer des

effets spécifiques freins à la croissance et générateurs de chute de rendement. Parmi les ions susceptibles de s'accumuler dans un sol, on a : Ca^{++} , Mg^{++} , SO_4^{4-} qui sont également des éléments actifs de la nutrition minérale des végétaux avec K^+ , NO_3^- , PO_4^- .

Dans les sols salés on rencontre également Na^+ , Cl^- , CO_3^- , HCO_3^- ils ne joueraient pratiquement aucun rôle en nutrition minérale sauf éventuellement le sodium qui, chez certains végétaux, semble pouvoir se substituer au potassium et aurait une sorte de rôle d'épargne vis-à-vis de cette ion.

Pour ce qui est des toxicités spécifiques : tant sur le plan des mécanismes que sur le plan quantitatif (seuil de toxicité pour chaque ion) il est très difficile de préciser les choses.

En agriculture on ne mesure souvent que des résultats globaux : élévation ou baisse des rendements et il est dès lors difficile d'attribuer la conséquence à une cause quantitativement bien déterminée. Sur les mécanismes de toxicité il est également difficile de préciser : la toxicité peut provenir d'une action de l'ion sur la germination, le métabolisme : la respiration, synthèse des protéines, réactions enzymatiques (transferts d'énergie) etc....

Nous nous limitons alors à une simple énumération de quelques intoxications spécifiques avec seulement leurs manifestations externes

II.2.1 Le sodium

Parmi les sels dissous dans l'eau d'irrigation, le sodium est celui qui requiert le plus d'attention. De hautes concentrations en sodium peuvent être dommageables pour les plantes du fait de sa toxicité spécifique mais aussi pour les sols en modifiant leurs propriétés physiques. L'action du sodium sur les plantes se caractérise par des brûlures sur les feuilles. Certaines cultures telles que avocatier, agrumes amandier, fruits à noyaux... sont très sensibles à la présence du sodium. Par ailleurs, le sodium a un effet défloculant sur le complexe adsorbant du sol. En effet une forte concentration en sodium dans la solution du sol entraîne le

gonflement et la dispersion des argiles (formant le complexe adsorbant). Ces éléments fins occupent alors la porosité du sol, réduisant ainsi sa capacité à transmettre de l'eau et conférant à celui-ci une mauvaise aération. La réduction de la perméabilité a pour conséquence la formation de croûtes salées à la surface du sol du fait de la forte évaporation qui peut se produire sur des eaux presque stagnantes. Tous ces effets que nous venons de signaler sont défavorables quant à la croissance des plantes.

II.2.2 Le magnésium

Le magnésium ne présente pas un danger de toxicité pour les plantes. Cependant, en ce qui concerne le sol, un taux important de magnésium a presque les mêmes effets que le sodium.

II.2.3 Les chlorures et les sulfates

Lorsqu'ils sont présents dans l'eau d'irrigation, ces éléments contribuent à augmenter la concentration des sels solubles. Des concentrations excessives de chlorures et de sulfates peuvent causer des brûlures sur les bords des feuilles des plantes voir même entraîner leur mort. Des concentrations de 250 à 400 ppm (parties par million) sont considérées comme indésirables pour l'irrigation de plantes sensibles aux sels. Heureusement que les sels de chlorure et de sulfate sont rapidement solubles. Ils peuvent donc être lessivés dans les sols qui se drainent bien.

II.2.4 Le bore

Le bore est un élément mineur essentiel à la croissance de la plante, mais il n'est requis qu'en quantité minime. Le bore est soluble dans l'eau et on le trouve dans plusieurs sources d'eaux utilisées pour l'irrigation. Alors qu'une carence en bore a des effets néfastes sur la plante, une grande concentration de cet élément peut également s'avérer toxique pour celle-ci. De plus, le bore a tendance à s'accumuler dans le sol en formant des complexes chimiques qui sont difficiles à lessiver.

Tableau :tolérance relative des plantes cultivées aux bores
(**Annexe N° 7**)

II.2.5 Le bicarbonate

L'abondance des ions bicarbonates HCO_3^- dans l'eau d'irrigation mérite aussi d'être évaluée. Dans le cas où l'eau d'irrigation contient un taux élevé de bicarbonates, on constate une tendance à la précipitation du calcium et du magnésium, ce qui fait augmenter le SAR, donc la proportion de sodium.

L'influence des bicarbonates est observable en déterminant le carbonate de soude résiduel. Le carbonate de soude résiduel ($\text{CO}_3\text{Na}_2\text{résiduel}$) est par définition la teneur en milli équivalents de CO_3^{2-} et HCO_3^- restant lorsque tous les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} ont été combinés à ces anions

$$(\text{CO}_3\text{Na}_2\text{résiduel}) = (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$$

Les eaux contenant moins de 1.25 meq/l de carbonate de soude résiduel n'auraient aucune influence sur le sol alors que celles qui en contiendraient plus de 2,5 meq/l seraient dangereuses.

II.2.6 Le calcium :

En principe il ne pose pas de problème. De fortes teneurs sont parfois mal supportées par les halophytes et semi-halophytes. Malgré tout, sur les sols à forte teneur en calcium actif, les rendements peuvent être fortement affectés. Autres éléments

D'autres éléments mineurs comme le chrome, le nickel, le mercure le sélénium etc. peuvent être potentiellement toxiques. Pour la plupart on les trouve dans les effluents municipaux et industriels d'eaux usées épurées.

III.2.1 Procédés de lutte contre la toxicité :

Les problèmes de toxicité se manifestent à des concentrations relativement faibles dans l'eau d'irrigation. Si l'on pratique des cultures

sensibles, on peut être amené à adopter certaines techniques qui ont pour effet soit de diminuer la concentration effective des substances toxiques, soit d'apporter des ajustements permettant d'améliorer la production avec les concentrations présentes.

- ❖ Pratiques visant à diminuer la concentration effective des constituants toxiques :
 - Arroser plus fréquemment ;
 - Fournir un supplément d'eau pour le lessivage ;
 - En cas de toxicité par le sodium, utiliser un amendement, tel que gypse ou acide sulfurique ;
- ❖ Modifier l'approvisionnement en eau ou mélanger des cours de sources différentes.
 - Pratiques visant à adapter à la situation :
 - Faire des cultures moins sensibles ;
 - Fournir un supplément d'azote pour obtenir une fertilité maximum du sol, nécessaire à la croissance de cultures telles que les agrumes ;

Améliorer la gestion de l'eau quand celle-ci, par mauvais dosage ou mauvaise répartition, contribue au problème de toxicité. On peut notamment augmenter la fraction de lessivage, lessiver périodiquement, niveler le terrain, modifier le profil et installer un drainage artificiel ; Recourir à des techniques spéciales quand on emploie l'irrigation par aspersion.

IV.1 Tolérance des plantes à la salinité

Toutes les plantes n'ont pas la même réaction face à la salinité. Certaines plantes sont très sensibles, alors que d'autres le sont moins. Cette plus ou moins sensibilité des plantes dépend largement du stade végétatif de celles-ci. La réaction de la plante vis-à-vis de la salinité ne sera pas la même selon que celle-ci se trouve en phase de germination, de floraison, de maturation des fruits etc. Étant donné l'action de la salinité sur le comportement de la plante (réaction osmotique), il paraît logique

d'exprimer la tolérance des plantes à la salinité par la conductivité électrique de la solution du sol, facile à mesurer.

La notion de tolérance des plantes à la salinité intervient dans trois aspects essentiels:

a) La germination des graines

b) La croissance de la plante

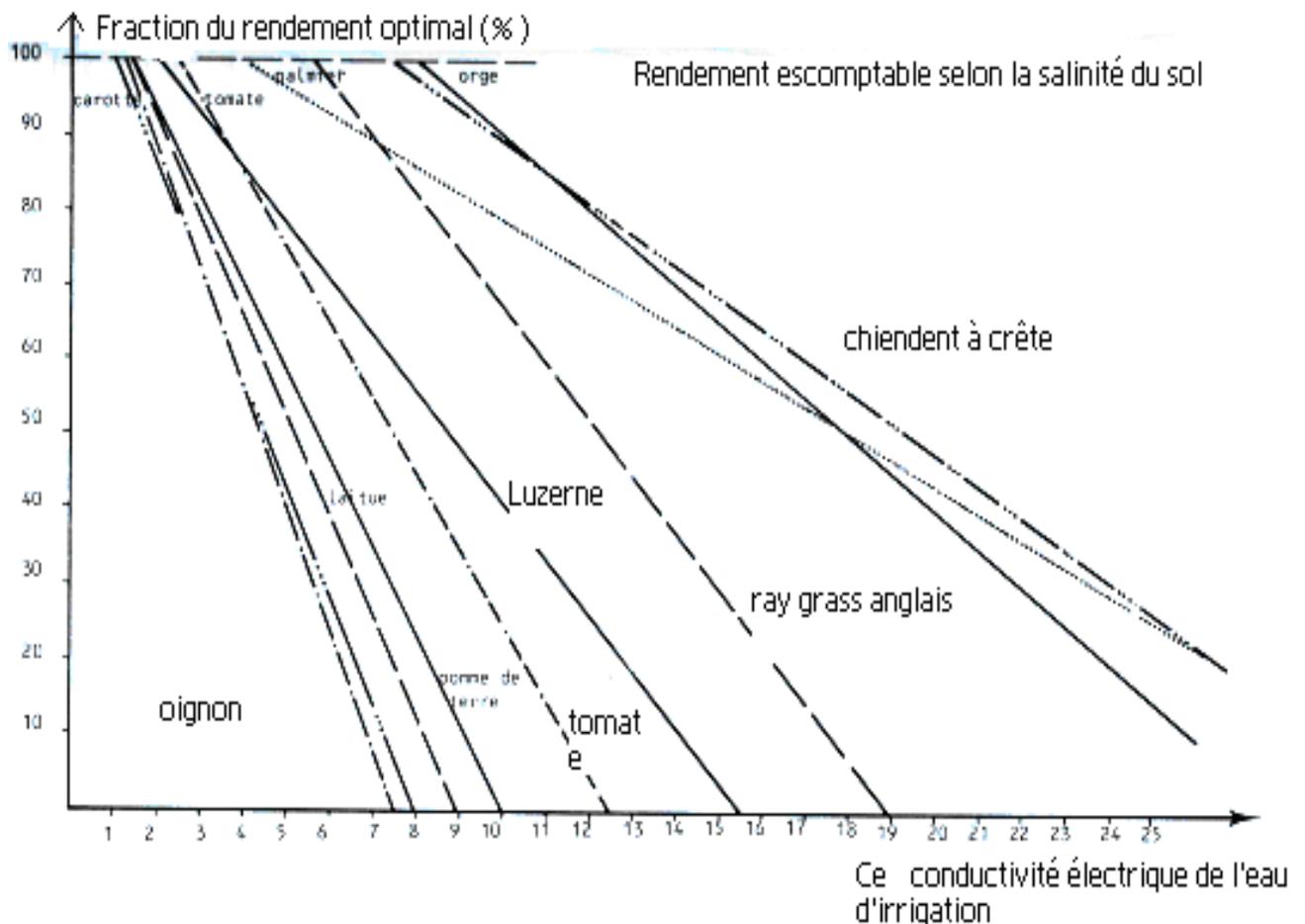
c) La production de récolte (aussi bien en quantité qu'en qualité).

- Tableau N°15: Table de tolérance à la salinité totale d'après Naas et Hoffman voir **(Annexe N° 8)**.

- Tableau N°16: tolérance de certaine culture au sodium voir **(Annexe N° 9)**.

- Tolérance de certaines cultures la salinité et les effets sur les rendements

a) Rendement escomptable selon la salinité du sol



source: Etude PNUD tunisie-1970

Ece: conductivité électrique de l'extrait de pâte de sol saturé

Ecs: conductivité électrique de la solution du sol avec $Ecs = Ece \cdot SP / HS$ avec

SP: humidité pondérale de la pâte saturée

HS: Humidité pondérale au champ

b) Relation entre le rendement et la salure du sol

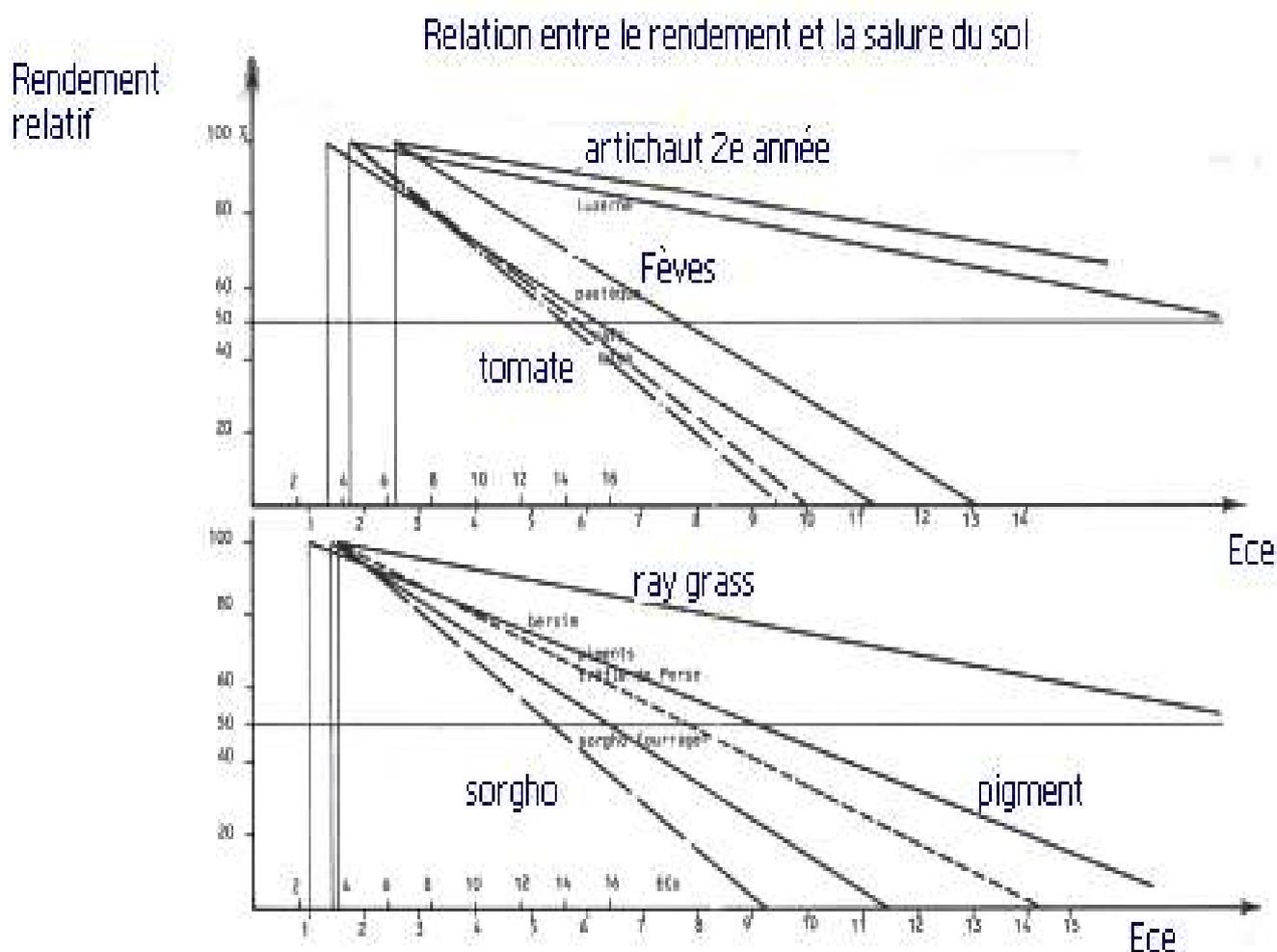


Figure N°11 : a) rendement escomptable b) relation rendement et salure

IV.2.1 Phénomènes d'échange cationique dans les sols

En principe tous les sols contiennent des minéraux argileux et de la matière organique. Ces éléments souvent fortement imbriqués portent le nom de complexe argilo humique et sont caractérisés par la présence de charges électriques négatives tout autour de leur surface. Leur

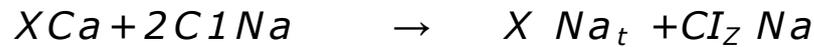
regroupement en agrégats confère au sol une bonne structure (bonne aération et bonne conductivité hydraulique) favorable à la croissance des végétaux. Ces charges négatives attirent les charges positives des cations en solution dans l'eau du sol et ceux-ci sont alors fixés tout autour du complexe argilo humique, ce qui lui vaut d'ailleurs l'appellation complexe adsorbant. L'ensemble des places disponibles autour du complexe adsorbant est appelé capacité d'échange cationique (C.E.C.) et est exprimé en milli-équivalent (még) par unité de poids de sol. Le sol constitue donc un système d'équilibre dynamique entre le complexe adsorbant et ses cations d'une part et la solution du sol et ses cations libres d'autre part. Du fait que les cations ne sont pas retenus avec la même force autour du complexe adsorbant, la qualité de la liaison va donc dicter les propriétés physiques du sol. Ainsi, si dans un sol, l'ion qui est principalement adsorbé est le sodium (Na), la liaison est facilement rompue (par une forte pluie par exemple) car très faible. En effet l'ion Na est monovalent et entouré d'une grosse pellicule d'eau, ce qui fait qu'il n'est pas aussi énergiquement retenu que Ca ou Mg (ions divalents fortement retenus). Il se produit donc au niveau des sols à haut pourcentage de sodium, les phénomènes de gonflement et dispersion des argiles, conférant aux sols des propriétés physiques médiocres (faible perméabilité).

Remarquons que l'adsorption d'un cation X à la fois présent dans la solution du sol et sur le complexe adsorbant ne dépend pas de la quantité de X mais de sa concentration relative dans la solution du sol, ainsi que de sa nature. C'est ainsi qu'à concentrations égales dans le sol, les Ca et Mg sont préférentiellement adsorbés par rapport au sodium. Le type de salinisation d'un sol dépendra alors de la nature et de la proportion des ions adsorbés sur le complexe.

IV.2.2 Effets de la salinité sur le complexe adsorbant

L'état ionique du complexe adsorbant dicte les propriétés physico-chimiques du sol. Si l'évolution de l'état ionique du complexe adsorbant

d'un sol est difficile à prévoir avec exactitude, il est possible par contre de connaître sa tendance évolutive. Les échanges qui se produisent entre l'eau d'irrigation et le sol se schématisent par la réaction d'équilibre:



Le danger que l'on craint le plus pour un sol venant de l'ion Na, (alcalinisation) il faudrait chercher à connaître la proportion de sodium (ou de magnésium) que fixera le complexe du sol en équilibre avec la solution que constitue l'eau salée d'irrigation. cette proportion de sodium sur le complexe adsorbant peut être appréciée à l'aide de l'ESP qui lui même est lié à la SAR caractéristique de la solution du sol.

IV.3 Evolution de la salure du sol avec l'utilisation d'eaux salées

Elle concerne l'accumulation au niveau du sol dans le temps des sels apportés par l'eau d'irrigation. Une eau salée d'irrigation favorise l'accumulation de sels qu'elle apporte dans le sol. Ainsi la salure du sol aura tendance à évoluer du fait de cette accumulation dans le temps.

D'après J.-H. DURAND:

Si C est la concentration des sels dans l'eau d'irrigation en g/l

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

R: le volume d'eau retenu dans le sol en l/Kg de terre sèche (différence entre l'humidité à la capacité au champ et l'humidité de sol avant arrosage).

Q: le volume d'eau d'arrosage en l/Kg de terre sèche et par arrosage La quantité limite de sels apportés par l'eau d'irrigation est:

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

La quantité de sels retenus par le sol après n arrosages sera alors:

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

L'étude des variations de cette fonction X_n montre qu'en définitive, après un certains nombres d'arrosages, le sol contiendra une quantité de sels K apportée par l'eau d'irrigation. Il est important de signaler que cette valeur de K ne dépend pas de la teneur initiale en sels solubles du sol, elle ne dépend que des valeurs de C , Q et R . Quand l'accumulation de sels dans le temps devient trop importante, le sol devient stérile, c'est à dire qu'aucune culture ne pourra y être pratiquée.

L'étude de l'évolution de la salure du sol permet théoriquement

- d'estimer la quantité de sels solubles accumulée au cours des irrigations

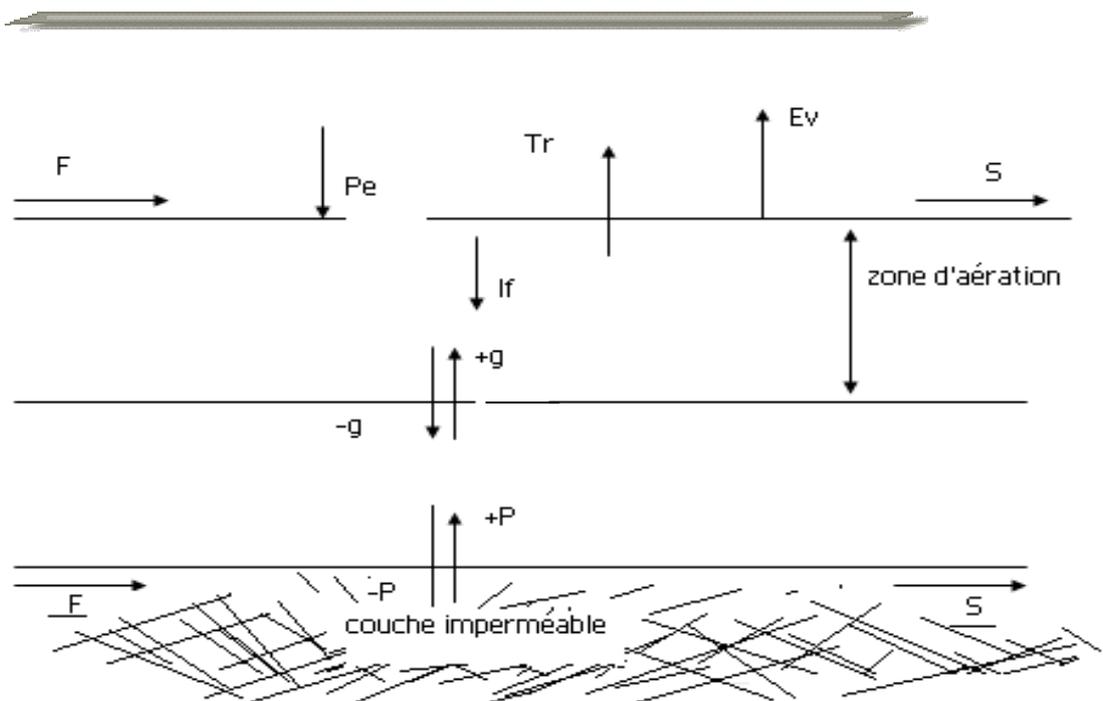
- de calculer les doses et le nombre des arrosages permettant d'amener la salure du sol à un taux déterminé (doses et fréquences de lessivage) sans grandes conséquences pour les plantes.

Il existe une méthode se basant sur des bilans hydriques donc pour la prédiction de la salinité des sols. Elle est donnée ici comme information sachant que certains paramètres utilisés sont difficile a évaluer sur terrain

VIII. prévision (prédiction de la salinité des sols à l'aide des bilans hydriques au niveau de la parcelle sur un hectare :

VIII.1 bilan hydrique avant irrigation :

Figure N°12 : bilan hydrique avant irrigation



➤ bilan des eaux de surface

$$\Delta \varpi_s = P_e - E_V + E - S - I_f \quad (1)$$

➤ bilan des eaux de la zone d'aération

$$\Delta \varpi_{z-a} = I_f - T_r \pm g \quad (2)$$

➤ bilan des eaux de la nappe phréatique.

$$\Delta \varpi_{np} = \underline{F} - \underline{S} \pm P \pm g \quad (3)$$

Avec

Pe : précipitation

F, F flux entrant

S, S flux sortant

Ev. : Évaporation

Tr : transpiration

If : infiltration

g : la pesanteur

P : contact avec les nappes plus profondes.

En faisant la somme de 1 et 2 nous aurons :

$$\Delta \varpi_s + \Delta \varpi_{z-a} = P_e + F - (T_r + E_v + S) \pm g$$

$$\Delta \varpi_s + \Delta \varpi_{z-a} = P_e - ETP + (F - S) \pm g$$

$$\text{Si } \Delta \varpi_s + \Delta \varpi_{z-a} = 0$$

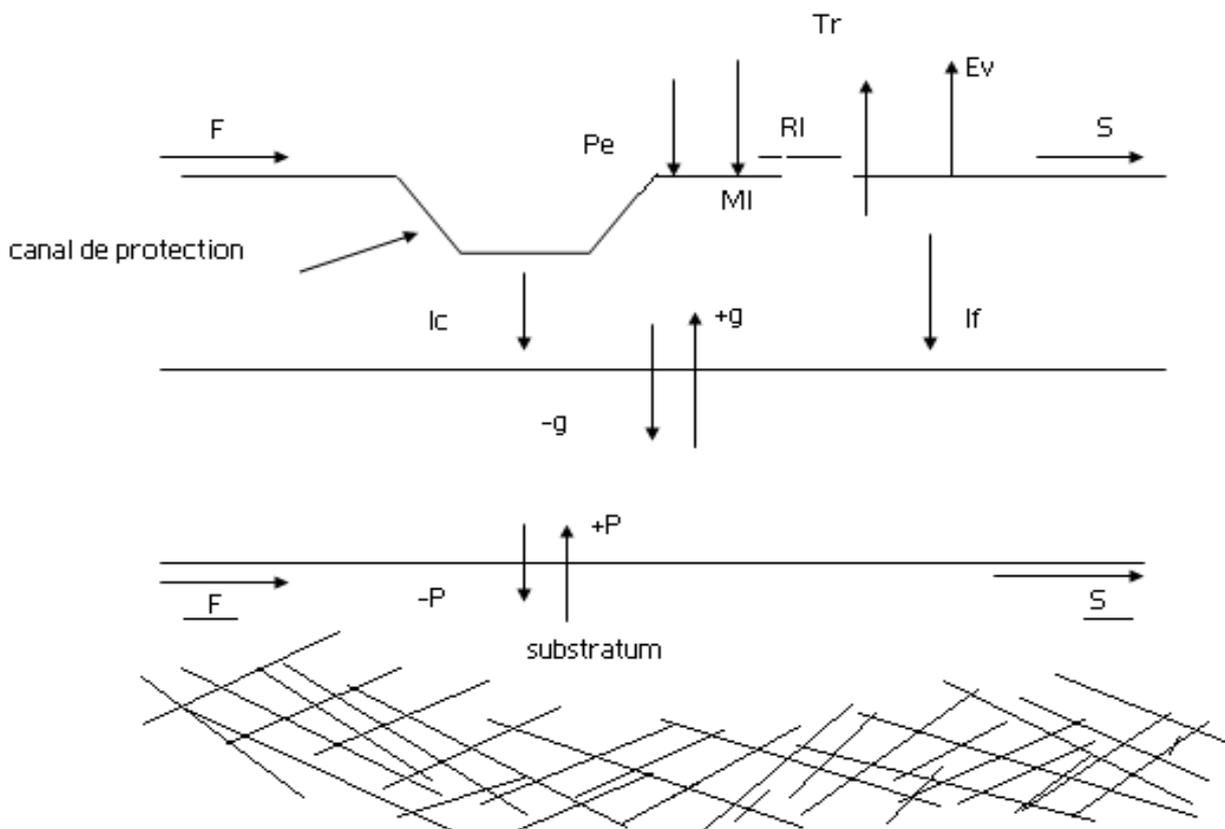
$$P_e - ETP + (F - S) \pm g = 0 \Rightarrow$$

$$\text{On a } \pm g = ETP - P_e - (F - S)$$

- ❖ si g est négatif (-) alors on a un mouvement descendant donc pas de risque de salinisation.
- ❖ Si g est positif (+) alors on a un mouvement ascendant donc risque de salinisation par remontée de la nappe nécessitant un lessivage et du drainage.

VIII.2 Bilan hydrique après irrigation :

Figure N°13: bilan hydrique après irrigation



- Bilan des eaux de surface

$$\Delta \varpi_s = P_e + MI - E_V + F - S - I_f - RI - I_c \quad (1)$$

- Bilan des eaux de la zone d'aération

$$\Delta \varpi_{z-a} = I_f - T_r \pm g \quad (2)$$

- Bilan des eaux de la nappe phréatique

$$\Delta \varpi_{np} = \underline{F} - \underline{S} \pm P \pm g + I_c \quad (3)$$

Les hypothèses :

- Avec un Canal de protection on a $F=0$ et $S=0$
- Avec un Canal fermé $RI=0$

Donc on a :

$$\Delta \varpi_s = P_e + MI - E_V - I_f - I_c$$

$$\Delta \varpi_{z-a} = I_f - T_r \pm g$$

$$\Delta \varpi_{np} = \underline{F} - \underline{S} \pm P \pm g + I_c$$

En faisant la somme de 1 et 2 nous aurons :

$$\Delta \varpi_s + \Delta \varpi_{z-a} = P_e + MI - ETP - I_c \pm g$$

$$si \Delta \varpi_s + \Delta \varpi_{z-a} = 0$$

$$\pm g = MI + P_e - I_c - ETP$$

$$\Delta \varpi_{np} = (\underline{F} - \underline{S}) \pm P \pm g + I_c$$

$$(\underline{F} - \underline{S}) = \frac{k \cdot T_m (I_1 - I_2) \cdot L \cdot t}{S_p^b}$$

Avec

S_p^b : surface brute du périmètre irrigué. (Ha)

T_m : épaisseur moyenne de la couche d'aquifère. (m)

K : coefficient de filtration moyenne de l'aquifère (m/j)

L : largeur du courant des eaux de la nappe (m.)

t Equivaut à une année 365 jours

$I_1 ; I_2$ pentes de la surface de la nappe phréatique à l'amont et à l'aval

MI : la dose d'irrigation

I_c : infiltration à partir des canaux d'irrigation

RI : rejet des eaux d'irrigations en excès dans les colatures

- si g est négatif (-) alors on a un mouvement descendant donc pas de risque de salinisation.
- Si g est positif (+) alors on a un mouvement ascendant donc il y'a donc échange entre la nappe et la zone d'aération, risque de salinisation par remontée de la nappe nécessitant un lessivage e du drainage.

Une fois le processus déterminé, on doit obligatoirement déterminer les variations des eaux de la nappe pour pouvoir contrôler si la nappe remonte dan le temps voulu (10 ans, temps pluriannuels). A ce moment là il faut un drainage obligatoire en même temps que le réseau d'irrigation.

Si la remontée se fait au-delà de 10 ans le réseau de drainage attendre.

La composante I_c (perte par infiltration) est :

$$I_c = M_{pondere}^N \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)$$

η : Efficient du réseau d'irrigation

$M_{pondere}^N$: La dose d'irrigation nette pondérée

Les précipitations ainsi que l'ETP sont prises avec une probabilité de 80%.

Au cas où $g > 0$ alors le Mouvement est ascendant dans la couche active du sol. Risque de dépôt des sels et par conséquent risque de salinisation secondaire. Pour y remédier nous devront créer un mouvement descendant qui va permettre un lessivage des sel au delà de la couche active du sol.

Ainsi nous calculons la valeur de g^{exig}

$$g^{exig} = \alpha \cdot I_{net} \quad \alpha = -(0.15 \div 0.25)$$

Comparons maintenant les valeurs de g

$$\text{Si} \quad |g| < |g^{exig}|$$

Alors : Il est nécessaire d'augmenter la première dose d'irrigation afin d'assurer le mouvement descendant qui va lessiver les sels.

La nouvelle dose d'irrigation sera :

$$I_1 = I + \Delta I$$

Ensuite on détermine la perte par infiltration qui sera :

$$\Phi_1 = I_1 \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)$$

VIII. Conclusion :

L'étude de l'effet de salinité est très importante car elle nous permet de savoir les chutes probables de rendement quand on utilise une eau de conductivité connue. On voit bien que l'effet des sels peut être sur la plante en lui empêchant de s'alimenter ou sur le sol en lui détruisant sa

structure.

CHAPITRE V :

METHODES DE LUTTES CONTRE LA SALINISATION DES SOLS

CHAPITRE V:**METHODES DE LUTTES CONTRE LA SALINISATION DES SOLS :****I. Introduction :**

Devant l'ampleur que prend le problème de salinité des mesures efficaces de lutte contre la salinisation sont à prendre d'autant plus que l'utilisation d'eaux salées en irrigation est devenu obligatoire dans certaines zones du globe terrestre. Cette lutte a pour but de limiter l'extension des terres salées, de récupérer les sols pouvant être récupéré, mais aussi, d'améliorer les rendements des productions agricoles. Nous allons aborder dans ce chapitre les différentes formes de lutte qui sont souvent entreprises pour résoudre le problème de salinisation des périmètres irrigués.

La lutte contre la salinite des sols revêt deux aspects : un aspect qui concerne l'amélioration des rendements des cultures et un autre aspect qui concerne la préservation des sols.

a) amélioration des rendements des cultures

En ceux qui concerne les cultures, il faut prendre un certain nombre de mesure qui sont :

- ❖ Utiliser si possible les eaux de salinité moindre ;
- ❖ Choisir les cultures et les sols adaptées à la qualité de l'eau d'irrigation ;
- ❖ Apporter des doses supplémentaires de lessivage ;
- ❖ Mettre en place un dispositif de drainage efficace ;
- ❖ Choisir des systèmes d'irrigations adéquates.

b) L'autre aspect qui est en rapport avec la préservation des sols peut être scindé en deux (2) volets :

- une lutte préventive qui consiste à limiter l'extension des sols salés du fait de l'utilisation des eaux salées en irrigation.
- une lutte curative qui consiste en la récupération des périmètres affectées par la salinisation.

II. Méthodes d'aménagement et procédés agro techniques de lutte contre la salinisation :

II.1 Différentes méthodes de lutte contre la salinisation des sols :

On cherche essentiellement à améliorer la disponibilité de l'eau du sol pour la culture.

Voici quelques-unes des solutions :

- ❖ Irriguer plus fréquemment pour améliorer l'approvisionnement hydrique de la culture ;
- ❖ Choisir des cultures tolérantes à une salinité existante ou éventuelle ;
- ❖ Appliquer régulièrement un supplément d'eau pour satisfaire le besoin de lessivage ;
- ❖ Changer de méthode d'irrigation ; en adopter une qui permette de mieux lutter contre le sel ;
- ❖ Modifier les pratiques culturales.

Parmi les pratiques plus radicales qui permettent d'améliorer ou de restaurer la productivité d'un sol endommagé par le sel :

- Lessiver autant qu'il est nécessaire pour réduire la concentration saline ;
- Améliorer ou régulariser la surface ou la pente du terrain pour rendre l'application d'eau plus uniforme ;
- Modifier le profil du sol pour améliorer la percolation de l'eau en profondeur ;
- Installer un drainage artificiel s'il existe une nappe gênante ;
- Appliquer les amendements quand cela est nécessaire ;
- Changer l'approvisionnement en eau.

II.2 Méthodes d'aménagement des sols :

Il s'agit entre autre des méthodes qui permettent de réduire la salinité

surtout dans les zones côtières ou dans les zones ou il y'a des éruptions volcaniques. Mais rappelons que ces aménagements seuls ne sont pas efficace dans la lutte contre la salinisation des sols et doit toujours être accompagnée des mesures agro techniques.

II.2.1 1^{eme} cas : aménagement contre l'intrusion marine :

Association de digues et de canaux pour la lutte contre l'intrusion marine dans les rizières de Bandial (Sénégal).

II.2.1 2^{er} cas : aménagement sur une île volcanique :

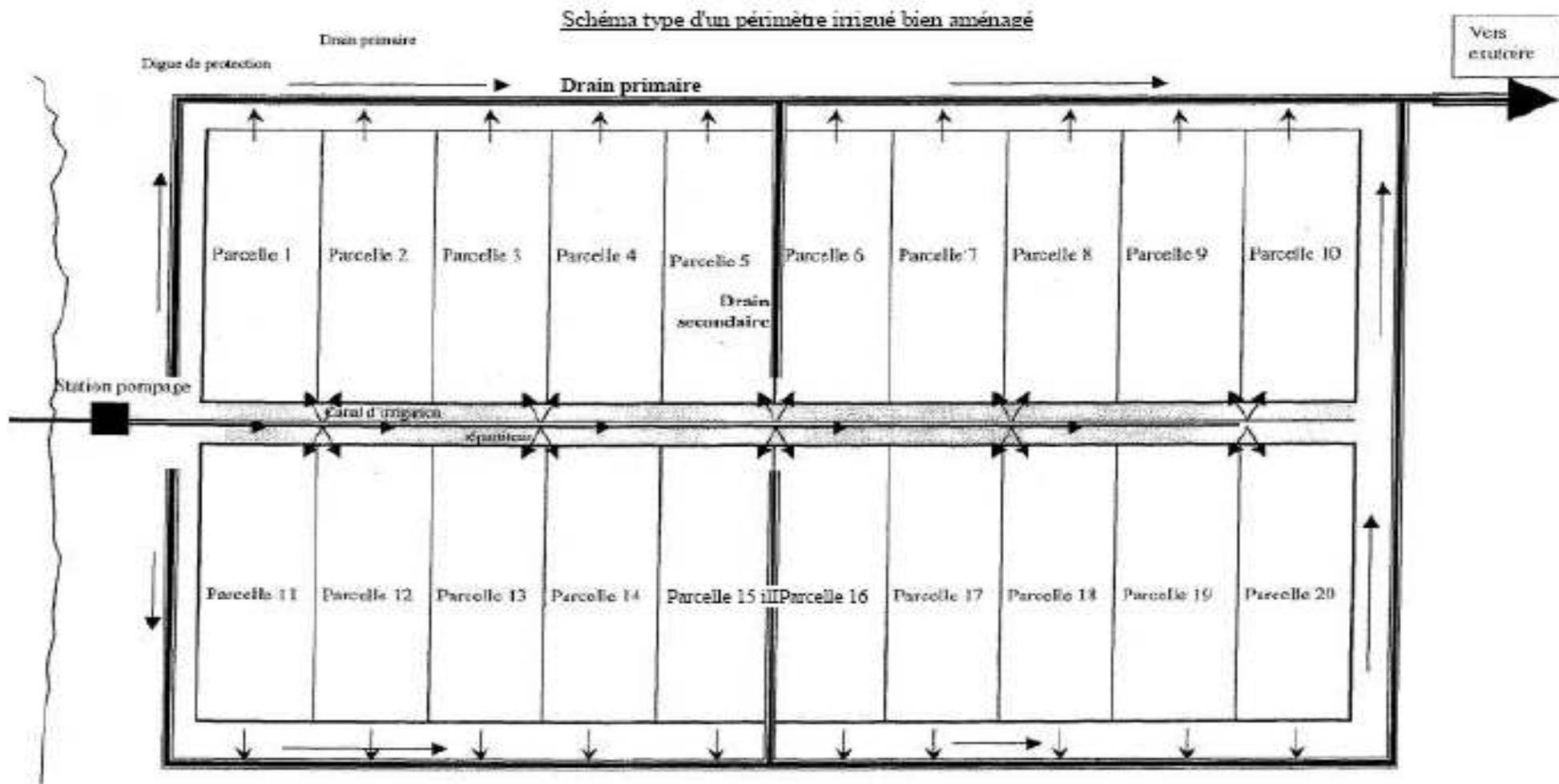
L'aménagement comporte deux aspects principaux :

- création de petites dépressions et de murettes pour retenir l'eau de pluie ;
- couverture du sol par une mince couche de graviers (basalte concassé) qui réduit l'évaporation.

Figure N°14 : aménagement sur une île volcanique :**II.2.3 3^{eme} cas : aménagement d'une riziculture :**

Il est constitué :

- ❖ D'un réseau d'irrigation
- ❖ D'un réseau de drainage
- ❖ D'un drain de ceinture
- ❖ Un réseau de piste rurale.



**Figure N°18 : schéma type d'un périmètre irrigué
Bien aménagé**

II.3 Méthodes agro techniques :

- Le lessivage
- Le drainage
- Le labour
- Les amendements chimiques.
- Planage
- Paillage ou Mulching

II.3.1 Le lessivage :

Si avant la mise en valeur et pendant l'étude de faisabilité ,la tranche de sol comprise entre 1 et 2m est salé ($[Cl^-]>0,01\%$), et si la nappe la plus proche est salé (CEP> 2g/l),on doit procéder a un lessivage capital. Ce qui signifie donnée à la tête de la surface du sol une quantité d'eau dite dose de lessivage pour saturer et dessaler la tranche du sol de 1 à 2m (dépassant la profondeur de la couche active du sol). L'eau utilisée va saturer le sol, dissoutes les sels solubles qui s'y trouvent et qui seront évacuées par le réseau de drainage déjà réalisé. Pour le cas des sols salins alcalins ou alcalin solonetz en plus du lessivage, il doit être traité par un amendement chimique.

En plus de la salinisation primaire nécessitent un lessivage, il est possible que pendant la période d'exploitation les sols deviennent salés par apport des sels solubles avec l'eau d'irrigation ou par la remontée de la nappe phréatique. Cette salinisation est dite secondaire. Pour y remédier on peut procéder à 2 types de lessivage.

- ✚ Un lessivage saisonnier réalisé avant que chaque saison végétative ne commence.
- ✚ Un lessivage d'entretien si l'apport de sel est faible.

En définitive la solution technique du choix d'un type de lessivage revient au calcul technico-économique et à la disponibilité de la ressource en eau .

II.3.1.1 Définition du lessivage :

Le lessivage est une pratique qui consiste à appliquer en dehors des besoins en eau des plantes des quantités d'eau supplémentaires afin d'entraîner tout ou une partie des sels dissouts dans le sol en profondeur, hors de la zone racinaire des cultures. Il permet donc de ramener la salinité du sol à son état initial (avant irrigation), ou de la maintenir à un niveau souhaité. Un lessivage ne peut être efficace que s'il est accompagné d'un drainage, surtout en la présence d'une nappe phréatique.

II.3.1.2 types de lessivage

Dans les zones humides ou les pluies sont abondantes, le problème de lessivage ne se pose pas car naturellement assuré par ces dernières. Cependant dans les zones semi arides et arides ou les pluies sont insuffisantes, les doses de lessivage doivent être apportées comme les doses d'irrigation.

Il est important de signaler qu'avec les systèmes d'irrigation à faible efficience, les pertes d'eau par percolation peuvent souvent suffire à lessiver les sels du sol, il n'est donc pas nécessaire d'apporter des doses supplémentaires de lessivage. Il existe deux formes de lessivage Selon la manière d'apporter les doses: le lessivage initial et le lessivage d'entretien.

II.3.1.3 Lessivage initial

Il consiste à apporter entre deux campagnes d'irrigation toute la dose de lessivage et d'un seul coup. Ainsi, les sels qui se sont accumulés dans le sol lors d'une campagne d'irrigation sont lessivés pour permettre au sol de reprendre son état initial avant la campagne suivante. Le mode d'application de l'eau sur le sol utilisé à cet effet est généralement un système d'irrigation de surface et particulièrement la submersion.

II.3.1.4 Lessivage d'entretien

Dans ce cas de figure, la dose de lessivage est apportée par fraction en même temps que les doses d'irrigation. C'est à dire qu'on ne laisse pas les sels s'accumuler dans le sol, ils sont progressivement évacués. Le système d'irrigation en place sert donc à l'application des doses de lessivage avec les doses d'irrigation.

II.3.1.5 Lessivage capital des sols salés :

Le lessivage capital se fait dans la tranche de sol de 1 à 2m lorsqu'elle est salée ($[Cl^-] > 0,01\%$). La durée peut aller jusqu'à 3 ans. Mais la mise en place de drain temporaire (fossé à ciel ouvert jusqu'à 1,2m) en plus du drainage permanent permet de diminuer cette période jusqu'à 1 ans. Dans le lessivage de terre initialement salé on distingue deux périodes :

- La première (1ère) période d'une année à trois (3) s'appelle période de mise en valeur (on procède au lessivage capital et aux amendements chimiques).
- La deuxième (2 ère) période qu'on appelle période d'exploitation : le but atteint pendant la 1ère période doit être maintenue pendant cette 2 ère période. Pour cela il est nécessaire de :
 - Assuré un réseau d'irrigation avec un coefficient de Rendement max $\eta_{max} = 0,95$ (perte par infiltration Très faible).
 - Assurer un régime d'irrigation à caractère lessivant.
 - Assurer un drainage efficace de ces sols.

II.3.2 Amélioration des sols salés par lessivage :

L'amélioration d'un sol salé implique l'évacuation et l'élimination de l'excédent de sel présent dans le sol. Cette élimination ne peut se faire que par lessivage : apport d'eau en quantité qui en percolant en profondeur devra entraîner une parité au moins des sels en excès. Sur des sols pas trop salés, la simple mise en irrigation peut être suffisante pour aboutir au déssalage de ces sols au bout d'une ou de quelques

saisons. Par contre, sur des sols très affectés, les besoins en eau de lessivage pourront être très importantes et dépasser de loin les volumes d'eau habituellement consacré à l'irrigation.

Rappelons que pour qu'un lessivage soit effectif, il faut évidemment que l'eau soit effectivement drainée en profondeur. Comme très souvent la salinisation d'un sol est liée à un manque de contrôle de nappes superficielles plus ou moins salées, l'installation d'un réseau de drainage peut constituer un préalable aux travaux de lessivage proprement dit. Ce réseau de drainage ne peut être dimensionné en fonction des conditions exceptionnelles imposées par les travaux de récupération. Il sera dimensionné pour les conditions normales supposées après récupération. Cela peut induire la nécessité de renforcer le système de drainage temporairement pendant la phase de récupération : ajouter par exemple quelques tranchées provisoires. Cela peut aussi avoir de l'importance sur le choix de la méthode de lessivage : apporter par exemple l'eau de lessivage de façon fractionnée pour éviter d'engorger le sol. Il est évident que toute technique, permettant d'accroître la conductivité hydraulique saturée du sol en place, peut ou doit être associée au lessivage proprement dit ; si il s'avère que cette technique peut améliorer considérablement l'efficacité de ce lessivage. Donc pour dessaler il faut lessiver.

Les questions qu'on se pose alors sont :

- ❖ Combien ?
- ❖ Comment ?
- ❖ Quand ?

Rappelons que " rattraper" un sol salé peut être très coûteux ; l'eau elle-même peut être une ressource rare. On a donc intérêt, avant de lancer de grandes campagnes, à estimer préalablement et le plus correctement possible la bonne réponse aux trois questions exposées ci-dessus. Il semble que seule l'expérience permette de dégager les bonnes réponses.

II.3.3 Calculs des doses de lessivages :

II.3.3.1 Notion de bilan salin dans le sol :

Le bilan salin dans un sol permet de déterminer la quantité de sels stockés au bout d'un certain nombre d'irrigation. il s'écrit:

$$\Delta S = I_w \cdot C_i - D_w \cdot C_d + S_a + S_s + S_p + S_e \quad \mathbf{V (1)}$$

Avec:

ΔS : la variation du stock de sels dans le sol

I_w : le volume d'eau d'irrigation

C_i : la concentration en sels de l'eau d'irrigation

D_w : volume d'eau de drainage (percolant sous la zone racinaire)

C_d : la concentration en sels de l'eau de drainage

S_a : la quantité de sels apportés par les engrais ou amendements

S_s : la quantité de sels mis en solution par l'eau traversant le sol

S_p : la quantité de sels précipités par l'eau d'irrigation

S_e : la quantité de sels consommés par les plantes

L'idéal serait de parvenir à un modèle ou ΔS serait égale à zéro ($\Delta S = 0$), c'est à dire à supposer que $S_a + S_s + S_p + S_e = 0$. Cependant, cette supposition serait trop grossière car tous ces facteurs négligés peuvent parfois s'avérer important.

II.3.3.2 Dose de lessivage :

Dans les normes la dose de lessivage capitale varie entre 15000 à 20000 m³/h alors que celles de lessivage saisonnier et interannuel varient entre 5000 à 7000 m³/h.

Il existe trois (3) méthodes :

- a) L'expression de valoubeev
- b) L'expression d'Averianov
- c) Méthode sur la conductivité électrique.

II.3.3.2.1 L'expression de valoubeev 1975

$$N_L = \alpha \times 10000 \times \log\left(\frac{C_i}{C_{ad\min}}\right) \quad \text{m}^3/\text{h} \quad \mathbf{V (2)}$$

pour $h \leq 1\text{m}$

$$N_L = 10000 \times \left(\alpha \times \log\left(\frac{C_i}{C_{ad\min}}\right) + \frac{h \times \alpha}{\mu} \right) \quad \text{m}^3/\text{h} \quad \mathbf{V (3)}$$

pour $h > 1\text{m}$. Avec

C_i concentration initiale des sels solubles en % de la masse de terre sèche.

$C_{ad\min}$: concentration admissible des sels solubles dans le sol.

α Paramètre qui caractérise les processus physico-chimiques dans le sol et qui tient compte de la diffusion, de la convection, l'évaporation de la nappe, échange solution du sol et de la matrice du sol.

h : profondeur de lessivage

μ porosité de drainage qui prend en considération la vitesse d'évacuation des eaux de lessivage.

Tableau N°9 : Quelques valeurs de μ

Ecartement en m	μ	$C_{\text{filtration}}$ en m/jours
200	2,6	2
100	3,7	2
407 ÷ 0	8	5 ÷ 10

II.3.3.2.2 L'expression D'Averianov

$$N_L = 10000 \times n \times \left(h + 2 \times A \times \sqrt{m \times \lambda \times h} \right) \quad \mathbf{V (4)}$$

Et

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D^* \times \frac{\partial^2 C}{\partial t^2} - V \times \frac{\partial C}{\partial x} \quad D^* = D_n + \lambda V$$

Avec

D^* : coefficient de diffusion et de convection

n : la porosité

D_n : coefficient de diffusion moléculaire

λ : coefficient de dispersion hydrodynamique ou coefficient de tortuosité.

V : vitesse de circulation de l'eau dans le sol.

h : profondeur de lessivage

NL : Dose de lessivage

A : dépend ou fonction du rapport

$$\bar{C} = \frac{C_{ad\ min}}{C_i} \quad A = f\left(\bar{C} = \frac{C_{ad\ min}}{C_i}\right)$$

Tableau N°10 : Quelques valeurs de A

\bar{C}	0	0,001	0,005	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12
A	∞	2,19	1,82	1,65	1,45	1,24	1,10	0,99	0,91	0,83

\bar{C}	0,14	0,16	0,18	0,20	0,25	0,30	0,35	0,4	0,45	0,50
A	0,76	0,70	0,65	0,60	0,48	0,37	0,27	0,18	0,09	0

Tableau N°11 : Les valeurs de λ

Φ	≤ 10	10 ÷ 20	20 ÷ 40	40 ÷ 60	60 ÷ 80
λ	0,010 ÷ 0,05	0,05 ÷ 0,1	0,1 ÷ 0,2	0,2 ÷ 0,5	0,5 ÷ 1

II.3.3.4 Lessivage d'entretien :

II.3.3.4.1 Détermination de la dose de lessivage avec la méthode de la conductivité électrique CE :

La première méthode (ou modèle) d'appréciation de ces besoins de lessivage consiste en la prise en compte du bilan salin, c'est-à-dire qu'on cherche à maintenir un équilibre entre sels apportés par l'eau et ceux évacués par le drainage. Le besoin en lessivage s'exprime comme suit :

Les besoins de lessivage (Leaching ratio (L_R)) pour une salinité de sol moyenne, et pour diverses cultures est déterminée par L'USDA

$$\frac{D_{d\omega}}{D_{\omega}} = L_R = \frac{E_{Cd\omega}}{E_{C\omega}} \quad \mathbf{V (5)}$$

Avec :

$D_{d\omega}$: Hauteur d'eau à drainer

D_{ω} : Litre d'eau d'irrigation

$E_{Cd\omega}$: Conductivité électrique de l'eau qui va être drainer

$E_{C\omega}$: Conductivité électrique de l'eau d'irrigation.

Le besoin d'irrigation est alors : $V = ETR \times \frac{1}{1 - L_R} \quad \mathbf{V (6)}$

Et on admet couramment que la salinité de l'eau de drainage est

environ le double de celle du sol. $E_{Cd\omega} = 2 \times E_{Ce}$

Ce modèle conduit à estimer des besoins en lessivage élevés, d'autant plus que l'efficacité du lessivage peut être faible dans certains sols, la percolation se faisant trop rapidement.

D'après des travaux (RHOADE-Bulletin FAO N°29), un modèle moins exigeant en eau peut être adopté, dans la mesure où on maintient le sol dans un état hydrique correct par des apports réguliers, sans période de pénurie. Ce modèle est le suivant :

$$LR = \frac{E_{CW}}{5 \times E_{Ce} - E_{CW}} \quad \mathbf{V (7)}$$

Avec :

E_{CW} : la conductivité électrique de l'eau d'irrigation

E_{Ce} : la conductivité

LR : la fraction d'eau qu'il faut apporter en supplément des besoins des

plantes. On suppose que cette fraction LR est entièrement efficace, c'est-à-dire qu'elle percole lentement à travers tout le sol ; en pratique l'hétérogénéité du sol fait que l'eau s'infiltré en partie très rapidement par des chemins préférentiels (racines, fissures, incrustations...) sans avoir d'action de lessivage. On est donc amené à considérer une efficience de lessivage (Le) fonction de la texture et de la structure du sol. Le besoin en lessivage est alors : $\frac{LR}{Le}$

" Le " peut varier de 30% pour des sols fissurés à 50-60% pour des textures moyennes et jusqu'à 90-100% pour des sols sableux.

Comme exemple : dans le cas des sols de l'OUED R'HIR à texture sablo-limoneuse fine, on peut retenir $Le=70\%$.

L'apport d'eau total à assurer est donc pour satisfaire les besoins en eau des plantes et le lessivage :

$$K_c \times ETP \times \frac{1}{1 - \frac{LR}{Le}} \quad \mathbf{V (8)}$$

Il faut noter que " Le " est un paramètre qui doit faire l'objet d'une expérimentation lors d'un essai de lessivage.

II.3.3.4.2 L'intensité du lessivage :

Le lessivage doit aboutir à une diminution de la salinité des sols soit par un apport massif initial, soit par un surplus apporté par chaque dose, "en régime permanent", pendant toutes les irrigations. Dans le cas des sols très salés de L'OUED R'HIR, il semble qu'un lessivage initial s'impose pour un dessalement compatible avec les cultures envisagées, et que le lessivage continu doit servir à maintenir une salinité constante dans le sol, après cette première opération.

L'intensité du lessivage est conditionnée par l'augmentation de rendement qu'on peut espérer, en regard du volume d'eau supplémentaire à apporter. Dans l'absolu, on peut apporter des doses de lessivage énormes avec des eaux très salées, pour arriver à des salinités du sol donnant des rendements acceptables. Concrètement, il

faut tenir compte des contraintes de pompage que signifient de forts besoins de lessivage, et on est amené à définir un optimum de salinité du sol (et donc de rendement) en fonction de la salinité de l'eau. En reprenant la méthode utilisée par le bureau d'étude SOGREAH pour le palmier, on peut chercher un optimum de la fonction simplifiée :

$$B = \frac{P}{I} \quad \mathbf{V (9)}$$

B : production/m³ d'eau

P : production/ha

I : volume d'irrigation et de lessivage continu/ha

Avec

$$I = \frac{1}{1 - \frac{LR}{Le}} \times ETR \quad \mathbf{V (10)}$$

$p = R \times (1,14 - 0,03 \times E_{Ce})$ ajustement linéaire du rendement sur la Salinité du sol.

R : rendement optimum

L'optimum est atteint lorsque la dérivée de B par rapport à E_{Ce} s'annule. On a alors la relation suivante (tous calculs faits) :

$$E_{Ce} = \frac{1}{5} \times \left(E_{CW} + \sqrt{\frac{190 \times E_{CW} - E_{CW}^2}{Le}} \right) \quad \mathbf{V (11)}$$

Qui donne, à titre indicatif, une relation entre E_{Ce} et E_{CW} , il faut noter cependant qu'il apparaît difficile, concrètement, de descendre au-dessous d'un seuil de salinité dans le sol pour une eau de salinité donnée. Ce seuil empirique valable pour le lessivage initial et pour le lessivage d'entretien se situe approximativement comme suit :

Pour une salinité de l'eau de 4-5(E_{CW}), la salinité du sol (E_{Ce}) ne peut pas descendre en-dessous de 1,5 fois la salinité de l'eau, soit :

Pour $E_{CW}=4-5$ mmho/cm , $E_{Ce}=1,5.E_{CW}$

On a aussi :

Pour $E_{CW}=6-8$ mmho/cm , $E_{Ce}=1,3.E_{CW}$

Pour $E_{CW}=12-15$ mmho/cm , $E_{Ce}=1.E_{CW}$

On peut retenir ces seuils comme limite à l'objectif de salinité des sols en notant qu'ils sont en bonne correspondance avec cet objectif, tel qu'exprimé théoriquement par la formule précédente. On peut noter enfin que les pertes par mauvaise efficacité d'application à la parcelle contribuent au lessivage. Pour une efficacité de 70% telle qu'envisagée avec des pertes par percolation de 20%, le lessivage est assuré jusqu'à $\frac{LR}{Le} = 20\%$. On peut donc ne pas appliquer de lessivage supplémentaire jusqu'à ce seuil, et au-delà, ne considérer que le seul lessivage, sans intégrer les pertes par percolation à la parcelle.

- Le lessivage d'entretien ou saisonnier (lessivage réduit) s'applique à toutes les techniques d'irrigations. La notion de lessivage réduit est plus efficace lorsque les arrosages sont fréquentes. L'intervalle de temps entre deux (2) arrosages est un facteur important dans le lessivage d'entretien du fait que plus cet intervalle est importante plus la force osmotique augmente et plus la plante souffre.

II.3.3.4.3 Lessivage des sols alcalins :

Un sol alcalin est un sol dont la capacité d'échange CEC ≥ 15 meq/100g de terre sèche avec la présence de Na^+ .

Les bases échangeables sont : Na^+ ; Ca^{2+} ; Mg^{2+} et K^+

Les sols alcalins sont difficiles parfois impossibles à mettre en valeur .La question qui se pose maintenant est :

Comment quantifier un sol alcalin ? :

Les résultats expérimentaux sur de long année ont démontrée qu'il y'a risque de d'alcalinité lorsque le sol à une capacité d'échange CEC ≥ 15 meq/100gde terre sèche. Alors On quantifie le risque d'alcalinité avec une CEC ≥ 15 meq/100gde terre sèche après une analyse des bases échangeables et on détermine le pourcentage (%) de Na et Mg dans le complexe absorbant.

Par exemple, en supposant qu'un sol à une capacité d'échange CEC=20meq/100g de terre sèche de sol, et que dans son complexe absorbant il y'a 8 meq/100g de terre sèche de Na.

Etant donnée que la CEC de sol est >15 meq/100g donc il y'a risque d'alcalinisation.

On détermine le pourcentage de Na dans le complexe absorbant, ce qui nous donne :

$$20\text{meq}/100\text{g} \rightarrow 100\%$$

$$8 \text{ meq}/100\text{g} \rightarrow X$$

$$X = \frac{8 \times 100}{20} = 40\% \text{ dans le complexe absorbant.}$$

Donc 40% de Na sur le complexe absorbant c'est-à-dire Na>10% qui est la limite admissible. Dons il est nécessaire de créer des conditions pour échanger du Na avec du calcium. Pour on doit vérifier 3 choses :

- Si l'eau d'irrigation n'est pas riche en calcium.
- Si des réserves de calcium se trouvent dans le sol.
- Analyser le coefficient de filtration du sol afin que les

cations bivalents soient transportés jusqu'à la profondeur où ils doivent être échangées. Dans le cas où l'eau d'irrigation et le sol après analyse sont pas suffisamment pourvus en calcium on est obligé de faire un amendement chimique.

II.3.4 Technologie d'application de l'eau de lessivage :

La première (1^{ère}) question qui se pose, c'est de savoir comment appliquer l'eau de lessivage, en une (1) , deux (2) ou plusieurs fois, par quel méthode, soit par submersion ; soit par ruissellement rapide ou soit par la méthode combinée des deux méthodes citées précédemment.

II.3.4.1 Méthode de submersion :

L'eau stagne entre 30 et 120 jours dans les bassins entourés de diguettes (généralement on les construits selon les courbes de niveau). Cette méthode permet un bon dessalage et une répartition uniforme de la

couche. Dans certains cas on tolère un écoulement minimal à l'aval du bassin.

A la fin de la période de 30 jours on met à sec les bassins (on évacue l'eau) et on fait un prélèvement pour contrôler le degré de lessivage et on décide si un nouveau lessivage est nécessaire ou non.

➤ **Les inconvénients :**

L'inconvénient de cette méthode tient du fait que les sels solubles restent sur les diguettes, d'autre part le temps est assez long et provoque une augmentation de la concentration suite à une évaporation d'eau. Ajouter à cela que la construction de la diguette qui pour les petites bassins est de l'ordre de 0,4 ÷ 0,6m de hauteur et de 20×20m ou 50×50m de dimensions latérales avec une hauteur d'eau de 20 à 30 cm et enfin une pente très forte pour ces petits bassins.

Tandis que pour les grandes bassins variant de 1 ÷ 3ha avec une hauteur de 0,9 ÷ 1,5m et une hauteur d'eau de 0,5 ÷ 0,7m et une pente faible. Cela veut dire que la construction des diguettes est très onéreuse (il faut un planage, un labour profond et une main d'œuvre).

II.3.4.2 Méthode de ruissellement rapide :

Le ruissellement rapide est la réponse à l'augmentation de la concentration de l'eau lorsqu'elle stagne dans les bassins.

Généralement on utilise cette méthode dans le cas de lessivage à faible profondeur. La construction est la même que la submersion, seulement l'eau ruisselle du premier au dernier bassin et on arrête le lessivage une fois que la dose est atteinte.

II.3.4.3 Méthode combinée :

Le sol est d'abord labouré à 45 cm et ensuite aplané. On construit après cela des rigoles et des diguettes avec une distance de 12 m entre elles. Elles doivent être perpendiculaire au diguettes et doit être que les digues. L'eau est ramenée par les rigoles arrivent aux diguettes, elles les inondent et alimente le bassin suivant. Lorsque le lessivage est arrêté on

procède à un nouveau labour de 45 cm ainsi que toutes les autres opérations successives tout en changeant la disposition des digues et des diguettes.

Conclusion : Une comparaison à été faite par OSTER en 1973 et les premières (1ère) résultats ont donné les résultats suivants :

- L'efficient de lessivage est meilleur lorsqu'on utilise la méthode discontinue.

II.3.4.4 Quelques informations sur les essais réalisés par le CRUESI EN Tunisie :

II.3.4.4.1 Essais réalisés sur la station de Utique :

Ces essais concernent des sols très salés : proximité d'une sebkha
 $C_e=60\text{mmho/cm}$ sur extrait saturé ; en moyenne dans les 20 premiers cm. Un réseau de drainage a été installé pour l'expérimentation.

Caractéristique : $E=40\text{m}$ et $h=1,40\text{m}$

L'eau d'irrigation (de lessivage) utilise, est caractérisée par :

$$C_e=2,1 \text{ mmho/cm}$$

$$\text{SAR}=5,7$$

La première série d'essais : 3 doses de lessivage comparée

$$D_0=0 \text{ mm (témoin)}$$

$$D=400\text{mm en 4 fois 100 sur 4 jours consécutifs}$$

$$2D=800\text{mm en 8 fois 100 sur 8 jours consécutifs}$$

Ce premier traitement n'a eu aucun résultat significatif sur un plan déssalage, échec quasi-total donc.

La deuxième série d'essais : 3 doses ont été comparées

$$D=400\text{mm en 4 fois 100 mm avec un retour de 15 jours}$$

$$2D=800\text{mm en 8 fois 100mm avec 1 fois par semaine}$$

$$4D=1600\text{mm en 8 fois 200 mm 1 fois par semaine}$$

Ces 3 mêmes doses ont été également utilisées sur des parcelles labourées à 25 cm 4 mois auparavant.

- Pour les parcelles non labourées, ces essais ont permis de déssaler très fortement le sol ; peu de différence ont été constatées entre les 3 doses.

Le succès obtenu cette fois, par rapport au premier essai, a été attribué a 2 causes :

- la pluie : pour le premier essai, 15 mm sont tombés avant
35mm pendant l'essai
Pour le second essai, 135 mm avant
130mm pendant
- l'apport plus distant : il a permis d'obtenir une alternance dessiccation-humidification provoquant une modification du système des fissures, laquelle a permis d'obtenir un meilleur rendement.

- Pour les parcelles labourées, le déssalage a été encore mieux réussi. Avant l'essai proprement dit, le labour plus l'eau de pluie avaient déjà crée un déssalage marqué. Cela a permis d'affirmer que le labour, en éliminant les fentes de retrait, favorise une meilleure répartition de l'eau et accroît ainsi nettement l'efficacité de l'eau lessivante.

Après l'apport d'eau de lessivage, un très bon déssalage sur 1m de sol a pu être obtenu avec peu de différences entre les 3 doses.

Sur base de ces essais, on peut conclure que :

- L'intérêt de labourer avant le lessivage
- L'intérêt d'effectuer le lessivage pendant la période des pluies
- L'intérêt à appliquer l'eau en fraction hebdomadaire ou bi-mensuel.

❖ **Calendrier des irrigations de lessivage :**

Le calendrier des lessivages ne semble pas déterminant, à condition de ne pas dépasser les tolérances des cultures pendant trop longtemps ou pendant les périodes critiques. Le lessivage peut être fait à chaque arrosage, de temps en temps à l'occasion des arrosages, une fois par an ou à intervalles plus longs. Quelle que soit la méthode utilisée, il convient de surveiller convenablement le sol et la culture. On peut utiliser l'analyse

du sol et des tissus végétaux pour déterminer la nécessité de l'époque des lessivages. Dans la plupart des cas, on préfère pratiquer un lessivage annuel en dehors des campagnes végétatives ou en périodes de dormance, par exemple en hiver. Dans certains cas, les précipitations suffisent pour assurer la totalité du lessivage nécessaire. En portant à son maximum l'efficacité du lessivage ou en réduisant LR, on peut diminuer les besoins en eau. Souvent, la marge de choix est limitée mais plusieurs des mesures suggérées ici sont susceptibles de convenir dans le cas donné :

- ❖ Planter en saison fraîche plutôt qu'en saison chaude, car LR est lié à l'ETP ;
- ❖ Planter des cultures tolérantes le sel, pour pouvoir diminuer la quantité d'eau nécessaire au lessivage ;
- ❖ Utiliser des pratiques culturales qui limitent l'écoulement dans et à travers les larges pores, par exemples travailler le sol pour diminuer le nombre des fissures en surface ;
- ❖ Utiliser des méthodes d'irrigations comme l'aspersion, qui distribue l'eau à une cadence inférieure à la vitesse d'infiltration du sol, afin de ralentir la circulation de l'eau à travers les larges pores. Il faut alors arroser plus longtemps mais ce système consomme moins d'eau que la submersion continue (OSTER et AL. 1972) ;
- ❖ Alternner submersion et drainage, au lieu d'utiliser la submersion continue (OSTER et AL. 1972) ;
- ❖ Humecter le sol avant le début des pluies hivernales quand les précipitations ne suffisent pas à assurer un lessivage complet. Sur un sol humide, une précipitation même peu importante assure un lessivage efficace car la pluie pénètre profondément dans le sol tout en fournissant une eau de très bonne qualité à la partie supérieure de la zone racinaire ;
- ❖ Quand il existe un réseau de drainage, lessiver par étapes : d'abord la partie centrale entre les drains, puis près des drains (YARON et AL. 1973).

La nature du sol peut limiter le choix dans la façon de lessiver. Si la vitesse d'infiltration est faible, il peut être nécessaire de reporter le lessivage après la récolte. Il faut tenir compte de l'effet des périodes de jachère sur la salinisation du sol. Les disponibilités en eau peuvent également limiter les possibilités en n'autorisant les lessivages qu'après la récolte ou avant les semis, ou en dehors des périodes de pointe de demande d'eau. Le lessivage en dehors de ces périodes permet de diminuer la capacité du réseau de distribution et influe par ailleurs sur la conception du drainage.

II.4 Le drainage

Le drainage a pour rôle d'éviter la remontée des sels de la nappe qui est alimentée par les pertes d'eau par percolation (doses de lessivage comprises) sous la zone racinaire des plantes. Cette remontée est non seulement dangereuse pour les plantes, mais aussi pour les sols. Car, combiné avec le phénomène d'évaporation elle peut être source de salinisation des sols. Le drainage est donc une mesure qui accompagne nécessairement le lessivage. Quand le sol a une bonne capacité de drainage naturel, le problème ne se pose pas, sinon, on doit faire recours à un système de drainage artificiel (réseau de drains enterrés, drainage taupe, sous-solage etc.). Par ailleurs, le drainage de surface ou assainissement agricole peut jouer un rôle important dans la lutte contre la salinisation des sols. En effet les ceintures de protection des périmètres irrigués (fossés de colatures des eaux de ruissellement) permettent d'éviter l'inondation de ceux ci par les eaux sauvages de ruissellement qui peuvent être elles mêmes salées ou contribuer à l'élévation des nappes. Le drainage est une pratique essentielle dans la gestion des sols salins. L'irrigation perturbe l'équilibre des flux d'eau préexistants dans une zone déterminée. Ce déséquilibre résulte généralement en une addition d'eau qui peut alors augmenter rapidement le niveau de la nappe phréatique. Une fois que la nappe est proche de la surface, la limite tolérable se situant autour des 3 m (entre

1,5 et 3 m), une quantité appréciable de cette eau peut alors remonter à la surface dû à l'évaporation de surface, résultant en une accumulation de sels dans la zone racinaire des plantes. De nombreuses méthodes existent pour drainer le sol, incluant des drains de surface ou souterrains. Il faut être particulièrement vigilant au fait que l'eau drainée doit l'être suffisamment loin pour qu'elle ne puisse pas se retrouver dans la nappe phréatique sous – jacente aux cultures. La réalisation d'un réseau de drainage est généralement prévue par les aménagistes si les risques de salinisation sont élevés et ont été clairement identifiés. C'est un investissement onéreux, aussi les concepteurs de projets font – ils généralement l'impasse sur les réseaux de drainage dès lors que les conditions initiales du site avant irrigation laissent espérer que les problèmes liés à la salinité resteront mineurs. Une fois le périmètre mis en place, les conditions d'utilisation et de maintenance présentent bien souvent une sur-irrigation et des fuites sur le réseau. Au bout de quelques années après la création du site, la dégradation est telle que les travaux de drainage deviennent indispensables. Ces travaux, après la mise en place du site, sont infiniment plus coûteux. On peut également récupérer les eaux de drainage afin qu'elles soient réutilisées sur des cultures moins sensibles au sel. Bien entendu cela est fonction de la salinité de cette eau de drainage et des conditions locales d'exploitations. Le drainage : unique solution durable pour maintenir la production agricole

❖ Pourquoi drainer ?

- Pour lessiver les sels en excès.
- Pour abaisser le niveau de la nappe.
- Drainer + apporter du gypse.

❖ Situations pour lesquelles le drainage n'est pas envisageable :

- ✚ Absence de conditions topographiques favorables.
- ✚ Que faire des eaux de drainage ?
- ✚ Recyclage en irrigation

❖ Gestion des eaux de drainage non réutilisables :

- ✚ Mieux assurer le recyclage des eaux en irrigation : Dans le delta du Nil, 3 millions de m³ sont actuellement réutilisés contre 13 millions potentiellement réutilisables.
- ✚ Injection des eaux salées dans des aquifères profonds.
- ✚ Désalinisation des eaux (Osmose inverse).
- ✚ Phytoremédiation (constructed wetlands) : utilisée pour éliminer le sélénium des eaux de drainage de Californie centrale.

II.4.1 Recyclage des eaux de drainage :

Tableau N°12: Recyclage des eaux de drainage
effet des eaux de drainage

EC_e , dS/m	Relative (%)	
	tout l'irrigation	l'irrigation des plantes
0.5	100	100
3.0	90.2	-
6.0	80.4	95.8
9.0	72.5	90.3
12.0	56.4	83.7
18.0	-	78.0

Source: Sharma *et al.*, 2000.

Drainage ou assainissement agricole comporte trois phases :

- Captage ou collecte des eaux excédentaires (drainage à la parcelle).
- Acheminement par un réseau de collecteur ou de fossés.
- Restitution au réseau hydrographique naturel(exutoire).

❖ Inconvénient d'un sol mal drainé :

- Difficulté de croissance des végétaux
- Circulation difficile de l'air
- Développement limite des racines
- Températures plus basses des sols humides.
- Prolifération de maladies et de mauvaises herbes

❖ Chute de rendement des cultures :

- Dégradation du sol
- Accroissement du temps et des coûts des travaux
- Difficulté d'accès aux parcelles aux moment opportun.

Effets positifs de l'assainissement du sol :

- Meilleure aération du sol
- Amélioration de la structure du sol
- Pénétration plus profonde des racines
- Echauffement plus rapide du sol
- Augmentations des processus de nitrification
- Diminution des mauvaises herbes et des maladies des cultures
- Travail du sol facilité
- Accès possible aux parcelles en temps opportun
- ❖ Augmentation du rendement des cultures et amélioration de la qualité des récoltes.

II.4.2 Principales méthodes de drainage :

Drainage de surface

Drainage de subsurface

✚ Par fossés à ciel ouvert

✚ Par drains enterrés

- Classique
- Techniques associées

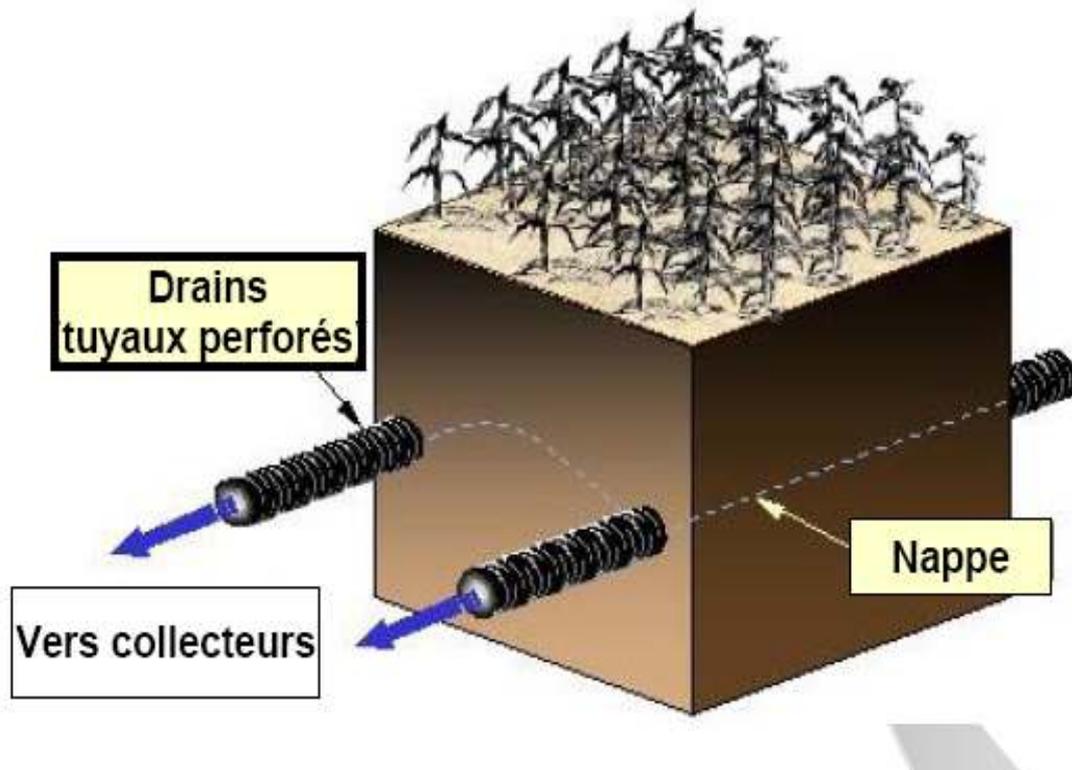
Drainage taupe

Drainage par galeries drainantes

✚ Par puits

✚ Bio drainage

Figure N°16 : Drainage par drain enterré



II.5 Paillage ou Mulching :

Durant les périodes de forte ETP entre 2 irrigations ou durant les périodes de jachère, les sels lessivés ont tendance à remonter à la surface. Toutes les pratiques culturales qui permettent de diminuer l'évaporation de la surface du sol (paillage, binage) ou d'augmenter la pénétration de l'eau en profondeur, seront bénéfiques pour diminuer la salinité autour des racines des plantes. Le paillage est bénéfique dans ce sens qu'il empêche l'eau de remonter à la surface. De plus, il a été démontré que l'arrosage par aspersion de sol paillé résultait en une suppression plus importante des sels et donc une meilleure efficacité dans le lessivage qu'avec une irrigation par submersion ou sans paillage.

II.6 Les Amendements :

L'influence des amendements minéraux sur les propriétés des sols salés a fait l'objet de nombreuses études à travers le monde (U.S.SL,1954 ;F.A.O,1975). La plupart des auteurs ont trouvé un effet favorable des amendements minéraux (gypse, plâtre, sulfates de fer, soufre, chlorure de calcium, la chaux, nitrate de chaux) sur les propriétés

physiques et chimiques des sols salés. Cependant il est important de signaler que les amendements organiques ont fait aussi l'objet d'étude montrant leur influence sur les sols salés ; dans ce cadre les avis sont partagés (HALITIM,1973). Par ailleurs, l'utilisation simultanée des deux amendements (minéral et organique) avait plus d'impact sur les propriétés physiques et chimiques des sols salés en dessalant rapidement et efficacement ces sols.

II.6.1 Type et utilisation des amendements :

II.6.1.1 Types d'amendements et leurs actions

Les amendements peuvent être classés en 2 types :

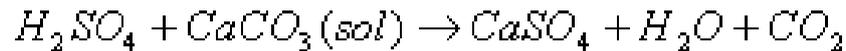
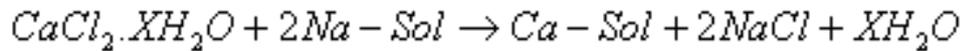
1. Ceux fournissant Ca^{2+} directement:
 - sels de Ca à solubilité modérée à élevée : CaCl_2 , CaSO_4
 - sels de Ca à solubilité faible: CaCO_3 , phospho-gypse.
2. Ceux fournissant Ca^{2+} indirectement par dissolution du calcaire présent dans le sol. Mais le calcaire doit être présent dans le sol.
 - Acides : H_2SO_4
 - générateurs d'acides: S (doit être oxydé par les bactéries) SO_2 , FeS_2 (pyrite).

Les amendements utilisés pour la récupération des sols alcalins sont:

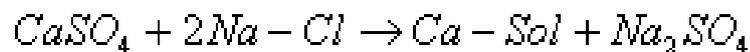
- Le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- Le soufre (S_2)
- Le CaCO_3 (carbonate de calcium)
- Le CaCl_2 (chlorure de calcium)
- Le H_2SO_4 (l'acide sulfurique)
- Le $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (sulfate de fer)
- Les polysulfates de calcium (CaS_2)
- sulfate d'aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$)

Ces amendements peuvent être classés sur la base de la vitesse de leurs réactions :

1. Action rapide

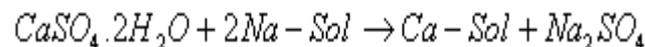


et

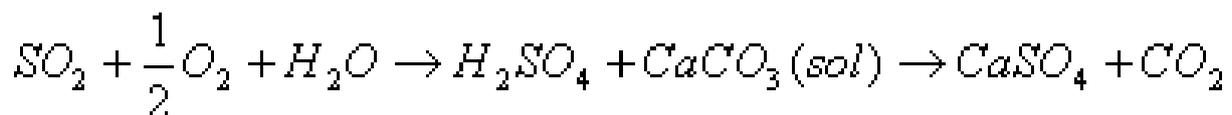
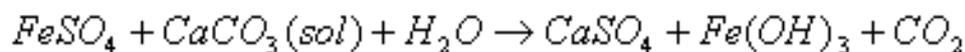


2. Action modérée : $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (gypse)

La vitesse dépend la taille des grains de gypse et de la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol.



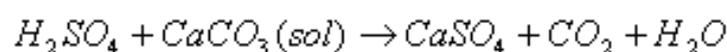
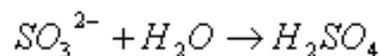
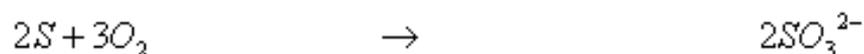
Action relativement lente



$CaCO_3$

4. Action lente

Bactérie oxydant S (Thiobacillus)



Ces différents amendements ont pour but d'apporter du calcium (Ca) soluble (dans le cas où le sol n'en contient pas) ou de favoriser la

dissolution du Ca dans la solution du sol. Dans tous les cas, le Ca va se substituer aux ions Na du complexe et ces derniers qui passent en solution doivent alors être lessivés. Toutes les mesures que nous venons d'énumérer, ayant pour objectif, la lutte contre la salinité nécessite quant à leur application une bonne connaissance de la migration des sels dans le sol et de leurs effets, spécifiques ou associés. Dans les sols contenant beaucoup de carbonate (CaSO_4) et en fonction du propriété du sol on fait un amendement chimique d'acide sulfurique Le H_2SO_4 , de sulfate de fer ou de sulfate d'aluminium.

L'utilisation des acides minéraux entraînent la diminution du pH du milieu et comme conséquent la solubilité du carbone.

Si le $\text{pH} > 9$ alors

$$S = \frac{E \times h \times v \times \theta}{p}$$

S : quantité d'acide sulfurique à utiliser en T/ha.

E : la somme des ions $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ en (méq /l)

h : profondeur du sol à amender en (m)

v : poids volumique en T/m³

θ : poids équivalent (1 méq/l \rightarrow 0,049g).

P : pourcentage de H_2S dont l'élément chimique est utilisé comme amendement.

Nous avons entre autre :

- ❖ Les sols à réaction neutre (contient du chlorure et du sulfate).

La quantité d'amendement de gypse est :

$$G = 0,086 \times [Na - 0,1 \times E_E] \times \gamma \times h$$

- ❖ Les sols à réaction sodiques(NaCO_3 ; NaHCO_3

$$G = 0,086 \times [(Na - 0,1E_E) + (\zeta - 1)] \times \gamma \times h$$

- ❖ Lorsque le $Mg > 15\%$: la quantité d'amendement de gypse est :

$$G = \left[(Na - 0,1E_E) + (Mg - 0,3E_E) \right] \times \gamma \times h$$

Avec :

G : la quantité d'amendement de gypse

E_E : la capacité au champs du sol considéré

h : la profondeur de sol à amender en (cm)

γ : la densité du sol (N/m^3)

Na, Mg : quantité de sodium et de magnésium.

Lors des amendements chimiques les calciums augmentent et par conséquent une échange reflue du sodium dans la solution du sol.

Dans le cas de lessivage avec amendement chimique on utilise la même expression, seulement à la place de la concentration initiale C_i on ajoute :

$$C_i^* = C_i + C_i^a$$

Avec

C_i^* : somme totale des sels après amendement chimique ;

C_i : concentration initiale ;

C_i^a : concentrations des sels secondaires amené par le phénomène d'échange entre la solution du sol et la matrice solide.

En pratique la hauteur de sol à amender est de $h=25\text{cm}$ dans les sols alcalins à faible profondeur, et $h=50\text{cm}$ pour des sols alcalins de profondeur moyenne et enfin $h=60\text{cm}$ pour des profondeurs profondes.

II.6.1.2 Utilisation des amendements :

II.6.1.2.1 Amendements dans le sol ou dans l'eau :

En diminuant le taux de sodium de l'eau d'irrigation ou en augmentant les taux de calcium et de magnésium, on devrait pouvoir améliorer la perméabilité. A l'heure actuelle, il n'y a pas de procédé permettant d'éliminer de l'eau d'irrigation, et à un prix suffisamment bas pour pouvoir être utilisé en agriculture générale, des éléments comme le sodium. On

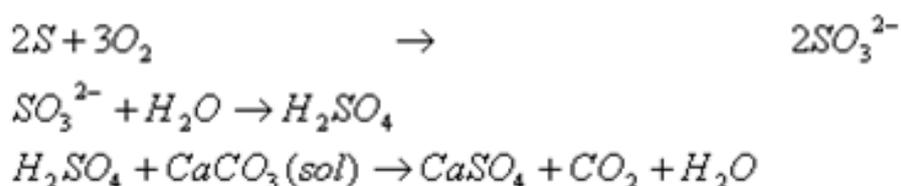
peut cependant ajouter au sol ou à l'eau des produits chimiques qui augmentent le taux de calcium et améliorent le rapport entre le sodium et le calcium. Si les conditions s'y prêtent, ce procédé peut améliorer la pénétration et la circulation de l'eau dans le sol. On peut soit appliquer directement du calcium (à partir de gypse par exemple), soit fournir de l'acide ou des substances acidifiantes (acide sulfurique ou soufre) qui mobilisent le calcium du calcaire (CaCO_3) contenu dans le sol ou diminuent la quantité de bicarbonate contenue dans l'eau. Il faut toujours procéder à des essais afin de déterminer si les résultats sont suffisamment avantageux pour justifier l'emploi de ces amendements. Le gypse, le soufre ou l'acide sulfurique ainsi le phosphogypse sont les produits les plus couramment utilisés pour amender le sol ;le gypse, l'acide sulfurique et le bioxyde de soufre servent à amender l'eau. Le gypse en granulés est appliqué à la volée sur les sols, à des doses allant de 2 à 20 tonnes/ha. Pour la restauration des terres posant de très gros problème de sodicité, on utilise souvent des doses allant jusqu'à 40 tonnes/ha. Lorsque le problème de perméabilité se pose essentiellement à la surface du sol, le gypse en granulés est peut être plus efficace s'il épandu en surface ou mélangé à la couche superficielle qu'enfoui profondément dans le sol. On estime que 700kg au plus de gypse par 1000m^3 d'eau peuvent être dissous chaque année à partir du gypse appliqué au sol. Même ainsi, il peut arriver que tout de suite après une application de gypse la couche superficielle du sol soit rapidement lessivé et manifeste à nouveau un manque de perméabilité caractéristique alors que le gypse est encore présent à quelques centimètres au dessous de la surface. Les applications dans l'eau nécessitent généralement une quantité de gypse beaucoup moins grande à l'hectare que celles effectuées au sol et elles sont particulièrement efficaces avec une eau peu salée ($\text{EC}_w < 0.5 \text{mmhos/cm}$) ;elles sont moins efficaces, par contre, avec une eau salée en raison de la faible solubilité du gypse (environ 0,25 pour cent) de sorte que la quantité de calcium qui peut se dissoudre est trop faible pour compenser effectivement la forte teneur en sodium. Pour

l'emploi dans l'eau, on utilise du gypse finement moulu (parfois de 0,25 mm ou moins , et non du gypse en granulés ou naturel) que l'on ajoute de façon plus ou moins permanente et à dosage constant pendant toute la période d'irrigation. Le gypse ainsi apporté fournit généralement au maximum de 1 à 4 meq/l de calcium à l'eau d'irrigation. La vitesse de pénétration de l'eau s'améliore de façon variable mais peut s'attendre à des augmentations de 30 à 40 % quand le gypse est efficace. Le degré d'amélioration obtenu dépend de l'état du sol ainsi que de la teneur en calcium de l'eau et de sa salinité totale.

Note : 1 meq/l de calcium provenant d'un gypse pur (à 100%) équivaut à 86 kg de gypse pour 1000m³ d'eau.

II.6.1.2.2 Utilisation du soufre

- Le soufre est efficace en application au sol quand on veut corriger un problème de sodium si le sol contient du calcite (CaCO₃). Il fournit indirectement du calcium : par oxydation il donne de l'acide qui à son tour réagit avec la chaux pour fournir du calcium. Le processus d'oxydation (par les bactéries du sol) est relativement lent et nécessite un sol chaud, humide et bien aéré. Comme le soufre est appliqué au sol et n'est pas soluble dans l'eau, cette technique permet de remédier efficacement à des problèmes de sodium au dessous de la surface du sol mais n'a pas d'action sur la perméabilité en surface car le gypse qui se forme est facilement lessivé à plus grande profondeur. Le soufre, employé avec une eau d'irrigation de bonne qualité, a donné de bons résultats pour la restauration des sols.



II.6.1.2.3 Utilisation de l'acide sulfurique :

- On utilise également l'acide sulfurique, directement au sol ou dans

l'eau d'irrigation. Il réagit seulement avec le calcaire du sol, le processus n'étant pas nécessaire. Dans certains cas, il donne une amélioration plus rapide de la perméabilité que le gypse. Mais , à quantité équivalente, le résultat final est à peu près le même qu'avec le gypse. L'acide sulfurique est une substance extrêmement corrosive et dangereuse à manipuler ; il peut endommager les conduites en béton, les ouvrages en acier, les vannes ainsi que les tuyaux d'aluminium (ne le confier qu'a des opérateurs expérimentales).



L'application du soufre et de l'acide sulfurique, du sulfate d'aluminium doit être effectuée sur un sol ayant un $pH \geq 6$.

Pour les sols à $pH < 6$, si la chaux n'est pas disponible dans le sol, alors on amène du gypse et du $CaCl_2$ (chlorure de calcium) .

II.6.1.2.4 Utilisation du gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) :

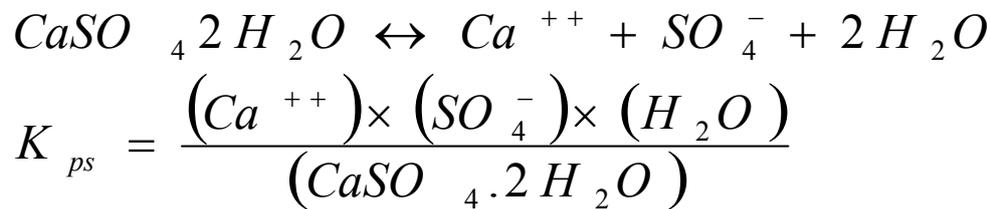
Le gypse est un minéral communément présent dans certaines couches géologiques et dans certains sols des zones arides (ANTOLINI, 1977). A cause de sa solubilité naturelle, sa présence peut significativement altérer la chimie du sol et l'eau d'irrigation (DUTT, 1962). En agriculture, le gypse est utilisé comme source de calcium soluble pour l'amendement des sols à complexe sodique (OSTER, 1982). Les premiers travaux en matière d'aménagement des sols à complexe sodique utilisant cet amendement sont ceux de LEATHER (1914), qui a trouvé que le gypse améliore la perméabilité de ces sols. D'autres travaux se sont succédés après, notamment ceux de Nasir etc. durant la décade (1969-1979).

En pratique on utilise de 6-40 Tonnes par hectare selon le degré d'affectation et du type de sel.

Réaction du gypse dans un sol à complexe sodique :

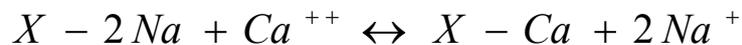
Une des limites souvent citées avec l'utilisation du gypse comme amendement sur les sols à complexe sodique est sa solubilité naturelle. Beaucoup de travaux ont essayé de déterminer la réaction du gypse sur

ce type de sol en interprétant le taux de dissolution du gypse dans ce sol (ARORA et AL. 1981). Théoriquement, la solubilité du gypse dans l'eau peut s'écrire :



Produit de solubilité=Kps=10^{-4,85} (HELGSON ,1969).

Le calcium soluble du gypse qui doit remplacer le sodium du complexe absorbant du sol réagirait ainsi :



Avec X= complexe absorbant.

Cette réaction d'équilibre peut être caractérisée par un coefficient de sélectivité d'échange :

$$K_c = \frac{(Ca_e^{++}) \times (Na^+)^2}{(Na_e^+) \times (Ca^{++})}$$

Avec :

(Ca_e^{++}) et (Na_e^{++}) = formes échangeables

(Ca^{++}) et (Na^+) = formes solubles

Le degré de réaction du gypse dans le remplacement du sodium est limité uniquement par sa solubilité.

RICHARD (1954) a montré que 30 cm d'eau d'irrigation sont suffisantes pour dissoudre 2,5 tonnes de gypse /ha, en considérant que la concentration du gypse dans la solution du sol est comprise entre 1/3 et 1/2 de la solubilité du gypse. CHAUDHARY ET WARKENTIN (1968) ont observé que la concentration du gypse dans l'eau de lessivage atteint un maximum de 1/3 de sa solubilité. HIRA ET SINGH (1980) ont observé que la quantité d'eau nécessaire pour dissoudre le gypse possède un seuil limite et n'augmente pas avec la quantité du gypse appliqué. L'utilisation

d'un modèle de simulation par DUTT (1962) et al.(1972), a permis de développer un programme basé sur la solubilité du gypse et l'équation d'échange du sodium par le calcium, ils supposaient que 52 à 72 cm d'eau sont nécessaire pour la dissolution de 16 à 24 tonnes de gypse appliqué à l'hectare. La dissolution du gypse dans un sol sodique augmente linéairement avec le taux de sodium échangeable de ce sol. Pour une valeur du taux de sodium échangeable de 78,9% on obtient approximativement une solubilité de 7,4g de gypse par litre ; ce qui représente plus de 3 fois la solubilité du gypse dans l'eau (ABROL et AL. 1979). ABROL et AL.(1980) ont montré que la solubilité du gypse augmente linéairement avec le taux de sodium échangeable selon la réaction :

$$Y = 0,0168X + 0,18 \quad (r=0,98)$$

Avec :

Y=la solubilité du gypse (g/l)

X=le taux de sodium échangeable

Par ailleurs, OSTER et HALVORSON (1978) ont montré que la solubilité du gypse dans l'eau augmente plus de 10 fois quand il est mélangé avec un sol alcalin. La dissolution du gypse dépend aussi de la surface spécifique des particules, du temps de contact et de la concentration en sels de la solution (KEMPAR et AL. 1975). Selon GOBRAN et MIYAMOTA (1985), la dissolution du gypse augmente avec la concentration des sels. A des concentrations équivalentes égales de NaCl₂ et MgCl₂, la dissolution du gypse est plus rapide dans la solution de MgCl₂ que dans la solution de NaCl₂, mais la différence dans le taux de dissolution n'est pas significative (TANJI et DONEEN.1966). Selon ces auteurs, la dissolution du gypse dans les solutions de Na₂SO₄ et MgSO₄ est inférieure de 30% à celle obtenue dans les solutions de MgCl₂ et Na Cl pour des concentrations équivalentes (Tableau N°8). L'importance de l'échange entre le calcium et le sodium dans un sol sodique amendé avec du gypse augmente avec l'importance du taux de sodium échangeable du sol. Cet échange se manifeste par la

dissolution du gypse et la présence des ions sulfates en solution, la corrélation entre le taux de sodium échangeable et les ions sulfates dans la solution est significative. La dissolution du gypse est affectée par la nature des anions en solution, le taux de dissolution diminue dans le

sens : $CO_3^- \succ HCO_3^- \succ Cl^-$

Tableau N°13 : solubilité du gypse dans les différentes solutions de Na Cl à 20°C

Solution de NaCl en g/l	0	2,9	14,6	8,5	131,1	204,7	292,6
Solubilité du gypse à 20°C en g/kg	2,14	3,1	4,0	6,0	7,3	6,3	5,3

La dimension des particules de gypse affecte sa solubilité ; en effet , les particules très fines du gypse sont très actives au début du contact avec les particules du sol, mais leurs effcience s'affaiblie par la précipitation relativement grande du calcium en présence des carbonates solubles souvent présents dans les sols sodiques (ABROL Et al. 1975). En augmentant la finesse des particules de gypse, la surface de contact avec la solution du sol augmente, ce qui permet une plus grande solubilité du gypse. HIRA et AL. 1980 ont montré que la colonne d'eau nécessaire dans un sols sodique pour dissoudre le gypse appliqué diminue de 12 à 2,5 cm d'eau quand la taille des particules du gypse diminue de 2 à 0,1 mm. HIRA et SINGH (1980) ont trouvé aussi que 4 cm d'eau sont suffisantes pour solubiliser tout le gypse ayant la dimension des particules inférieure à 0,26 mm. Une relation entre le taux de dissolution de la masse du gypse, la taille des particules gypseuses et le taux de sodium échangeable a été proposée par HIRA et AL. (1981), en modifiant l'équation de SWARTZENDRUBERD et BARBER (1965) qui s'écrit :

$$\frac{dm}{dI} = K \times S \times E_{na} \quad (1)$$

Avec

m = la quantité de gypse (gramme)

I = la colonne d'eau d'irrigation (cm) apportée après mélange uniforme du gypse avec le sol.

S = la surface totale de la particule (cm²)

K = produit de solubilité du gypse

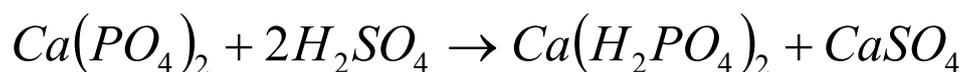
E_{na} = le sodium échangeable (équivalent gramme).

II.6.1.2.5 Utilisation du phosphogypse dans la mise en valeur des sols salés :

La possibilité de l'utilisation du gypse comme amendement minéral sur les sols salés a été confirmée à travers les différents travaux de recherche menés par plusieurs auteurs à travers le monde. Dans ce sens, nous allons essayer de valoriser la possibilité de l'utilisation du phosphogypse dans les conditions salines, tout en sachant que ce dernier possède des caractéristiques semblables à celle du gypse, qui lui permettent certainement d'affecter les propriétés des sols salés.

II.6.1.2.5.1 Caractéristiques du phosphogypse :

Le phosphogypse est un sous produit de l'industrie phosphatière. Il est obtenu au cours du processus de fabrication des engrais phosphatés, par la transformation du phosphate naturel en superphosphate simple en faisant réagir de l'acide sulfurique sur le phosphate naturel ; on obtient un mélange de gypse et de phosphate monocalcique ayant une teneur de 18% environ de P₂O₅ (Tableau N°9).



Ainsi au niveau du complexe D'ANNABA on évacue quotidiennement près de 2500 tonnes de phosphogypse à la mer. La richesse de ce sous produit en calcium et son pH bas ont amené plusieurs pays du monde (Inde, U.S.A , Hongrie, Roumanie) à valoriser ce sous

produit en agriculture comme amendement notamment sur les sols à complexe sodique.

Tableau N°14: composition chimique du phosphogypse du complexe ASMIDAL D'ANNABA

Composés	Formule chimique	Analyse (%)
Eau de cristallisation	H ₂ O	18,68
P ₂ O ₅ soluble	P ₂ O ₅	0,50
P ₂ O ₅ syncristallisé	P ₂ O ₅	0,52
P ₂ O ₅ insoluble	P ₂ O ₅	0,25
Acide phosphorique	H ₃ PO ₄	0,68
Acide tricalcique	Ca ₃ (PO ₄)	1,81
Oxyde de magnésium	MgO	0,035
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	0,00
Oxyde d'aluminium	Al ₂ O ₃	0,09
Sulfate de calcium	CaSO ₄	79,22
Silice	SiO ₂	0,780
Fluor	F	0,62

L'utilisation du phosphogypse comme amendement des sols sodiques a fait l'objet de plusieurs travaux. MEHTA et YADAV,(1977) ont trouvé que le phosphogypse utilisé sur les sols sodiques est un amendement efficace. Cependant il est nécessaire de déterminer les effets secondaire du fluor contenu dans l'amendement sur la qualité nutritionnelle des cultures.

KHOSLA et YADAV (1976) ont observé que l'addition de 20 à 30 tonnes/ha de phosphogypse sur de sols sodiques dont le pH est compris entre 8,1 et 10,2 et le taux de sodium échangeable entre 14 et 80, donne un résultat significatif dans l'amélioration des propriétés physiques du sol telles que la porosité, la conductivité hydraulique et une augmentation de la production agricole du riz et du blé. Les doses de 20 tonnes/ha de phosphogypse et de 200 kg de sulfate d'ammonium ont été utilisées aussi par VLAS et OPREA (1967) sur un solonetz, et ont permis d'obtenir des meilleurs rendements sur du fourrage. Selon OPREA et AL.(1969),

l'utilisation du phosphogypse à une dose de 20 tonnes/ha sur une parcelle bien drainée a permis l'amélioration de la rétention en eau du sol avec une diminution du taux de sodium échangeable sur une profondeur de 20 cm du sol. Selon les mêmes auteurs, la dose de 12 t/ha de phosphogypse a été utilisée sur des sols de type Solonchak-Solonetz avec une dose de lessivage allant de 5000 à 15000 m³/ha, et a permis de lixivier les sels solubles jusqu'à une profondeur de 1,80 m et de diminuer le taux de sodium échangeable de 45% à l'état initial à 30% pour la dose d'eau de 5000 m³ et à 14% pour la dose de 15000 m³. pour FILLEP et AL. (1981), l'utilisation du phosphogypse sur un sol sodique a permis l'amélioration de la conductivité hydraulique de ce sol et son complexe absorbant dans les horizons de surface et de profondeur, ce qui a permis une augmentation de la production du blé d'hiver.

II.6.1.2.5.2 Comparaison : gypse- phosphogypse :

L'étude comparative de ces amendements nécessite la comparaison de la composition chimique de chacun d'eux. En effet, les résultats d'analyses chimiques du phosphogypse Algérien ont montré que ce dernier contient 97,90% de gypse (CaSO₄.2H₂O) alors que le gypse de mines est constitué de 98% de gypse (CaSO₄.2H₂O), ce qui montre que les deux amendements contiennent des teneurs en gypse très proche. La même constatation est faite pour le phosphogypse utilisé en Europe de l'Est qui dose 98,70% de gypse. En outre, les deux amendements possèdent d'autres constituants chimiques secondaires communs et d'autres non communs à faible concentration tels que l'acide phosphorique pour le phosphogypse qui est responsable théoriquement de la baisse du PH de cet amendement. Par ailleurs, le phosphogypse contient une certaine quantité de fluor qui pourrait avoir des effets néfastes sur la qualité des productions végétales. Globalement, les 2 amendements ont la même teneur en gypse (CaSO₄.2H₂O), ce qui laisse croire à un effet commun sur le comportement des sols sodiques.

Tableau N°15 : composition chimique du phosphogypse utilisé en Hongrie

constituants	CaSO ₄	H%	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	F
pourcentage	70,4	28,3	2,4	0,13	0,01	0,9	0,8	0,60

Action commune sur le comportement des sols salés :

Tous les pays concernés par le problème de la salinité des sols, ont opté pour aménager leurs sols auparavant en utilisant du gypse. Cependant la richesse de certains pays en gisements phosphatés les a orienté à exploiter le phosphogypse qui dérive de l'industrie phosphatière pour l'aménagement de ces sols. Cette orientation n'est pas simplement due à un avantage économique mais aussi pour des raisons techniques. En effet, les caractéristiques chimiques de ce produit semblent être meilleures que celles du gypse, avec un pH bas, une solubilité légèrement supérieure à celle du gypse et une teneur en éléments fertilisants appréciable (P₂O₅ soluble, MgO, K₂O). Les résultats de l'étude comparative entre le phosphogypse et le gypse faite par BENSALÉM (1987) sur les propriétés physiques d'un matériaux argileux, a révélé que les 2 amendements ont un même effet de stabilisation sur le matériau, et l'effet physico-chimique observé à l'équilibre (sulfate de calcium-solution-argile) montre qu' il n'y a pas de différence entre ces 2 amendements

Tableau N°16 : solubilité du phosphogypse du complexe à différentes concentrations en chlorure de sodium.

Concentrations							
En sel soluble en g/l	0	1,16	3,50	7,01	10,50	14,02	17,52
Solubilité du phosphogypse en g/l	2,5	3,33	3,33	5,0	5,0	6,67	6,67

II.6.1.2.5.3 Le problème du Fluor :

Si le phosphogypse présente l'avantage d'être un amendement intéressant des sols sodiques, il présente aussi l'inconvénient d'avoir dans

sa composition chimique l'élément fluor qui s'avère toxique pour les animaux et l'homme, et peut leur causer des troubles cliniques telle que la Fluorose. Cette toxicité est due à l'accumulation du fluor au niveau de la plante qui le prélève directement du sol (PHILIPS et AL. 1955). Le fluor contenu dans le phosphogypse est sous forme de fluorapatite ($3Ca(PO_4)_2CaF_2$), c'est la forme la moins soluble du fluor, sa teneur varie selon la nature des phosphates naturels. Le phosphogypse Algérien dose entre 0,4 et 0,7%, alors que dans le gypse sa teneur est comprise entre 0,5 et 1,5%. La recherche au stade actuel, a permis d'expliquer certains comportements de cet élément présent dans le phosphogypse et le gypse au niveau du sol et son impact sur le végétal. La réflexion sur ce comportement a été réalisé par OMUETI (1977). D'autre part, l'information sur l'effet du fluor sur la production et la composition chimique des cultures des céréales est insuffisantes (SINGH et AL. 1978). D'autres travaux ont permis de montrer que l'addition du phosphore dans le sol est utile pour minimiser l'effet nocif du fluor pour la plante (PRINCE et AL. 1949). Dans cette optique, les travaux réalisés par SINGH et AL. (1978) mettent en évidence :

- L'effet de la sodicité du sol sur la solubilité du fluor
- L'effet du fluor sur la production et la composition chimique du riz et du blé d'une part, et d'autre part l'interaction entre le phosphore et le fluor dans le sol sodique.

Les résultats ont montré une augmentation linéaire du fluor soluble avec le taux de sodium échangeable et le pH ayant respectivement pour coefficient de corrélation 0,93 et 0,95. LARSEN et WINDOWISON (1971) ont observé aussi que l'extraction élevée du fluor soluble se fait à des pH élevés, et ont attribué cette solubilisation au remplacement du fluor par l'ion hydroxyle. La concentration élevée du fluor soluble est davantage favorisée par la présence en excès du sodium qui forme le NaF, l'un des composés du fluor les plus solubles. Selon SINGH et AL. (1978), la présence du fluor en excès dans le sol diminue sa solubilité jusqu'à une valeur constante, ce qui laisse croire à une éventuelle quantité de fluor

immobilisée, responsable de l'absence de toute manifestation au niveau végétal. Ces chercheurs ont montré également que le fluor affecte la production de la matière sèche du blé durant les premiers stades de croissance et en phase de maturité des grains, la production de grains a été réduite significativement quand le fluor a atteint une concentration de 50 mg/l de sol. Les résultats ont montré aussi une augmentation linéaire du fluor dans la paille du blé quand le fluor soluble augmente dans le sol. L'effet nocif du fluor sur la production du blé n'a été guère éliminé par l'application du phosphore, même avec la dose la plus élevée qui est de 100 mg/kg de sol alors que qu'avec cette dose, on a enregistré une amélioration significative dans le cas du riz.

Tableau N°17 : effet du fluor sur la production (g/pot) du blé à un taux de sodium échangeable de 30%

F appliqué en mg/l de sol	50 jours de l'âge des plantes	Plantes à maturité	
		Pailles	graine
0	1,99	16,84	16,66
25	2,01	16,20	16,35
50	2,09	16,64	13,57
100	2,02	16,43	13,37
200	1,53	15,52	12,06
CD à P=5%	0,44	Ns	1,69

On peut utiliser des amendements autres que le gypse, l'acide sulfurique et le soufre. Les avantages de chacun doivent être expérimentés dans le cadre d'essais en champs pour déterminer le coût, la sécurité d'emploi et l'efficacité. Le tableau ci-dessous contient des données comparatives concernant plusieurs produits d'usage courant.

Tableau N°18: Amendement de l'eau et du sol et efficacité relative du point de vue de l'apport de calcium (FIREMAN ET BRANSON , 1965)

Amendement	Tonnes équivalent à 1 tonne de gypse pur (à 100%) ¹
Le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) *	1,00
Le soufre (S_2) **	0,19
l'acide sulfurique (H_2SO_4) *	0,61
sulfate de fer ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) **	1,09
Chaux + soufre (9%Ca+24% S) *	0,78
Chlorure de calcium ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) *	0,86
Nitrate de calcium ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) *	1,06

Avec

* utilisable comme amendement de l'eau ou du sol

** utilisable uniquement pour application au sol.

()¹ les chiffres ci-dessus correspondent aux substances pures. Sinon il faut faire le calcul suivant pour trouver le nombre de tonnes (X) équivalent à une substance pure (à 100%) :

$$X = \frac{100 \times \text{tonnes}}{\% \text{ depurété}}$$

Exemples : si le gypse est à 80%, $X = \frac{100 \times 1,00}{80} = 1,25 \text{ tonne}$.

C'est-à-dire que 1,25 tonne de gypse à 80 % équivaut à une tonne de gypse à 100 %.

Les amendements ne doivent être employés qu'en cas de besoin et les résultats obtenus doivent justifier leur utilisation ; ils ne doivent pas être employés dans le simple espoir qu'ils feront quelque bien. Les amendements chimiques coûtent cher. Ils peuvent être utiles quand la

perméabilité du sol est mauvaise par suite d'une faible salinité, d'une teneur trop forte en sodium ou carbonate/ bicarbonate dans l'eau. Ils seront inutiles par contre si le défaut de perméabilité tient à la texture, au compactage du sol, à la présence d'horizon bloquant (couches indurées, couches argileuses) ou de nappes élevées. Si la culture reçoit suffisamment d'eau pour fournir des rendements proches du maximum, les amendements n'augmenteront pas la production mais faciliteront éventuellement la gestion de l'eau, ceci au prix de frais supplémentaires pour l'achat, la manutention et l'application des amendements.

Exemples :

On utilise une eau peu salée ($EC_w=0,15\text{mmhos/cm}$) pour irriguer des agrumes. Des problèmes de perméabilité se sont posés dans le passé, provoquant un manque d'oxygène (stagnation de l'eau de surface).

Comme c'était l'époque de la nouaison, on a décidé d'ajouter du gypse à l'eau pour améliorer la percolation et prévenir l'engorgement et le manque d'oxygène à ce stade critique. Sur cette parcelle de 5ha, l'irrigation nécessaire était de 100mm. Le gypse disponible était de 70 % et il fallait augmenter de 2meq/l la teneur de l'eau en calcium.

Quelle quantité de gypse a-t-il fallu acheter ?

Donnée : volume total d'eau nécessaire = 5000m^3

86kg de gypse pur à 100%/1000 m^3 = 1meq/l Ca

Calcul :

Il faut : $86 \cdot 5 \cdot 2 = 860\text{kg}$ de gypse pur pour 2meq/l

Donc il faut : $\frac{860 \times 100}{70} = 1230\text{kg}$ de gypse à 70%

Tous les amendements utilisés sont efficaces dans les conditions adéquates :

Le choix de l'amendement chimique doit être régie par :

- ❖ Sa disponibilité
- ❖ Le coût

- ❖ La solubilité de l'amendement chimique c'est-à-dire le temps de réaction (temps nécessaire pour que l'amendement chimique réagisse).
- ❖ La présence de chaux et le pH.

III. Evaluation du problème de perméabilité :

L'estimation du risque de mauvaise perméabilité se fait à l'aide de trois critères :

- la conductivité de l'eau d'irrigation ;
- le taux de sodium échangeable du sol ;
- le type d'argile.

Pour apprécier les risques d'une mauvaise perméabilité, compte tenu des conditions d'emploi, une analyse ou une série d'analyse de l'eau sont nécessaires. Les données fournies par l'analyse sont EC_w , et les teneurs en Na, Ca, Mg, CO_3 et HCO_3

III.1 Solutions d'aménagement aux problèmes de perméabilité :

Les difficultés de perméabilité ne font que diminuer le volume d'eau mis en réserve pour être utilisé par la culture, aussi les mesures palliatives ne semblent-elles pas rigoureusement nécessaires tant que les besoins en eau pour la culture ou pour le lessivage peuvent être satisfaits. On peut être amené à envisager de telles mesures pour d'autres motifs découlant d'une perméabilité réduite, par exemple pour des raisons de saturation en eau, encroûtement ou compactage, mauvaise aération et germination défectueuse, ou pour envahissement par de mauvaises herbes ainsi que maladie. Ces inconvénients peuvent avoir un effet tout aussi marqué sur les rendements qu'un véritable manque d'eau dû à une mauvaise perméabilité du sol. Les pratiques correctives disponibles sont d'ordre chimique aussi bien que physique.

Parmi les pratiques préconisées pour conserver ou améliorer l'état chimique du sol ou de l'eau, citons :

- ❖ Les amendements du sol ou de l'eau (gypse, soufre, acide sulfurique, etc.)

- ❖ Les mélanges ou modifications de l'approvisionnement en eau d'irrigation.

Les méthodes physiques englobent les procédés culturaux qui ont pour but d'augmenter l'infiltration ou de diminuer la vitesse d'écoulement de l'eau en surface et de prolonger le temps pendant lequel celle-ci peut s'infiltrer :

- ❖ Arrosages plus fréquents
 - ❖ Façons culturales et labours profonds
 - ❖ Arrosages prolongés (durée)
 - ❖ Modification du sens de l'irrigation pour diminuer la pente de ruissellement
 - ❖ Recyclage des eaux de colature
 - ❖ Avec l'aspersion, réglage du débit d'arrosage en fonction de la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol
- Utilisation des déchets organiques.

IV. Récupération des sols salés en résumé :

La récupération des sols salés peut être une opération très simple et facile à réaliser, comme elle peut être délicate et onéreuse. Tout dépend du type de salure en place.

Les sols salins peuvent être récupérés par simple lessivage associé au drainage. La récupération des sols salins est certes une opération qui nécessite de grandes quantités d'eau et du temps, mais réalisable quand même sans problèmes particuliers. Par contre les sols alcalins sont les plus difficiles à récupérer du fait même de la nature des problèmes causés (cf chapitre classification des sols salés). La récupération de tels sols demeure une opération fastidieuse et coûteuse et parfois même irréalisables (degré d'affectation trop importante). Elle nécessite en dehors du lessivage et drainage des amendements calciques associés à des travaux de labour en vue d'améliorer les propriétés physiques des sols.

IV.1 Amélioration des sols salins et des sols sodiques

D'habitude, la première étape consiste à déterminer la cause, l'extension et la sévérité du ou des problèmes. Ceci peut être réalisé à travers une étude de reconnaissance pour recueillir des informations concernant les causes de la salinité

1. Caractères topographiques et géomorphologiques du terrain.
2. Observations et échantillonnage des sols pour déterminer l'extension et la sévérité des problèmes.
3. Présence de couches imperméables en surface ou en profondeur des sols.
4. Présence, profondeur et salinité de la nappe phréatique.
5. Qualité et quantité d'eau disponible pour l'irrigation.
6. Pratiques d'irrigation et d'aménagement des sols communes à la zone.

IV.2 Amélioration des sols salins

L'amélioration de sols salés est accomplie par lessivage et l'établissement d'un bon drainage. L'accumulation de sels à un niveau qui va réduire les rendements prend du temps. La plupart des eaux d'irrigation est d'une aussi bonne qualité que, sans lessivage, il faut 2 ou 3 ans d'irrigation avant que la salinité atteigne des niveaux nuisibles. En plus, la salinité aura moins d'effet sur la culture si son accumulation tarde à apparaître dans la saisons. Ceci indique que si la teneur du sol en sels est faible au début du cycle, l'efficience d'utilisation de l'eau pendant la saison peut être de 100 pourcent (pas de lessivage) sans perte de rendement due à la salinité. Pour la saison prochaine, la pluie et les pré irrigations ou les deux peuvent être utilisées pour humecter le sol en profondeur et lessiver les sols des sels accumulés pour permettre une bonne efficience d'utilisation de l'eau pendant la prochaine saison. Il est difficile de fournir l'eau pour la culture et pour le lessivage pendant l'été. Le facteur clé à se rappeler est que le lessivage n'est nécessaire que quand la salinité a atteint un niveau

qui dépasse le niveau de tolérance de la culture et réduit le rendement. Le moment de lessivage ne parait pas être très important tant que le niveau de tolérance de la culture à la salinité n'est pas dépassé pendant une longue période. Ceci ne veut pas dire que le lessivage n'est pas important. Le lessivage peut être réalisé à chaque irrigation, chaque deux irrigation ou moins fréquemment, tels qu'au niveau de la saisons. Dans la plupart des cas, l'utilisation inefficent de l'eau satisfait le besoin en lessivage et un lessivage supplémentaire sera du gaspillage d'eau.

IV.3 Amélioration des sols sodiques

La profondeur du sol à amender est déterminée par la profondeur racinaire optimale des cultures à cultiver. Quand cette profondeur est fixée, la quantité d'ions bivalents à apporter dans l'eau (en kéq/ha) peut être estimée par l'équation suivante:

$$(Ca + Mg) = (ESP_i - ESP_f) * CEC * D_a * Z_{sol} / 100$$

Avec ESP, CEC et D_a représentant les valeurs moyennes le long de la profondeur du sol et D_a : densité apparente du sol.

Les sols sodiques doivent être traités par une source de Ca^{2+} soluble afin de remplacer la Na^+ adsorbé sur le sol qui sera lessivé et transporté hors du profil.

Amendement nécessaire = Na échangeable à déplacer - [Ca du gypse du sol] + (Ca + Mg de l'eau d'irrigation) + (Ca + Mg de l'hydrolyse du calcaire] + facteur d'inefficacité.

L'amélioration des sols sodiques nécessite un bon drainage. Pour les sols salins sodiques l'amélioration peut commencer par la désalinisation ou la désodication. Le choix dépend de la perméabilité du sol. Si cette perméabilité est bonne on a le choix. Par contre si cette perméabilité est faible, il est nécessaire de déplacer Na d'abord afin d'améliorer les propriétés physiques. Il est plus économique de cultiver les parcelles

pendant l'amélioration de ces sols. Les cultures à utiliser dépendent de l'état de salinité/sodicité du sol, de la tolérance de la culture à la salinité/sodicité, de la productivité de la culture (aspect économique) et de sa contribution à l'amélioration des propriétés du sol (enracinement). Il existe d'autres méthodes telles que la méthode géochimie, puisqu'il y a manque d'eau les recherches sont portés sur d'autres méthodes moins consommatrices d'eau.

En résumé, voila les principaux éléments pour lutter efficacement contre la salinisation des sols

Schéma type d'un plan de lutte contre la salinisation



V. Suivi et contrôle de la salinité dans les périmètres irrigués :

Il existe plusieurs éléments permettant de surveiller la salinité au sein des périmètres.

- ❖ Soit par télédétection.

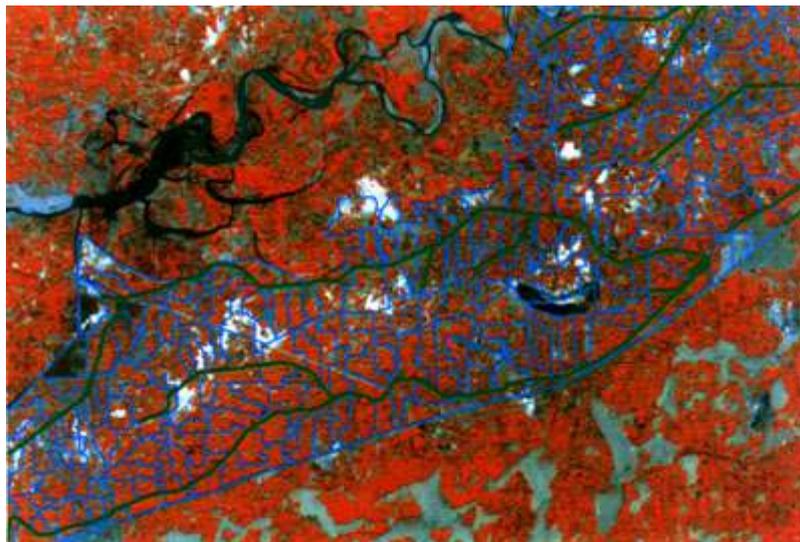
la présence de sels dans les sols et les nappes modifie les états de surface. La télédétection facilite l'identification et améliore la cartographie des sols salés. On distingue des effets directs sur la réflectance avec la

présence de sels en surface (croûtes ou efflorescences salines), et des effets indirects sur la structure (pseudosables), la végétation (stress salin, végétation spécifique) ou l'absence de végétation dans les cas extrêmes. Les caractéristiques spectrales des sels du visible au moyen infrarouge (0,4 à 2,5 μm), étudiées en spectrophotométrie au laboratoire, correspondent à des bandes d'absorption groupées dans le moyen infrarouge sous l'effet de l'eau libre ou intégrée dans le réseau cristallin (1,45 et 1,9 μm), des ions hydroxyles (OH, bandes à 1,4 et 2,2 μm) et de leur liaison avec Al^{3+} , et des ions carbonates et borates. La télédétection est devenue un outil de quantification en relation avec les différents constituants des états de surface et leur organisation. Les satellites opérationnels actuels possèdent des bandes spectrales d'environ 100nm.

-Les images SPOTS

- ❖ Au Pakistan, qui compte 17 millions d'hectares de terres irriguées, les images Spot sont ainsi utilisées pour améliorer la gestion et la durabilité de l'agriculture irriguée.

Figure N°17: l'image spot dans les périmètres du Pakistan



Cette image fait bien ressortir la forte densité du paysage agricole où très peu d'espaces restent inexploités. Ces zones autrefois cultivées sont aujourd'hui fortement affectées par la salinité (tâches blanches).

D'anciens méandres visibles au sud de la rivière Sutlej étaient autrefois utilisés comme canaux d'irrigation et forment des micro-dépressions qui concentrent de l'hydromorphie et de la salinité en taux important.

Les apports de l'imagerie SPOT :

Les images Spot sont utilisées comme outil d'analyse du périmètre, de référentiel géométrique pour la cartographie, de source de données pour le suivi de l'occupation du sol et de la salinité des sols, de complément à d'autres données pour la gestion de l'irrigation.

- ❖ Soit par Cartographie assisté par ordinateur (SIG)
- ❖ Et aussi soit par des modèles mathématiques

Tous ces éléments sont des outils modernes et fiables dans la surveillance de la salinité.

VI. Précautions à prendre après une (re)mise en valeur :

La récupération du sol salé ayant été probablement coûteuse, il faut éviter par la suite de re-saler le sol. Pour cela un certain nombre de règles élémentaires devront être respectées, on peut citer :

- une bonne gestion technique de l'irrigation ;
- le maintien des opérations de drainage (entretien des réseaux) et de lessivage ; avec contrôle permanent sur la salinité des eaux et des sols, ainsi que des niveaux des nappes superficielles ;
- l'apport éventuel d'amendement < calcaire > au cas où le lessivage aurait tendance à favoriser une alcalinisation ;
- un choix correct dans la rotation des cultures etc.

VII. Conclusion : la lutte contre la salinisation nécessite une combinaison de moyen humains technique et financier pour faire face a ce phénomène. On se rend compte ici que la méthode d'aménagement seule n'est pas efficace et doit être complété par les méthodes agro-techniques. Mais l'utilisation des amendements doit faire l'objet des essais expérimentaux pour éviter de faire des dépenses inutiles. Il existe aussi la méthode géochimie qui permet de précipiter les sels en profondeur mais celle-ci est en plein expérimentation.



CHAPITRE VI:
ETUDE DE GAS

CHAPITRE VI : ETUDE DE CAS

Introduction:

Compte tenu de l'étude bibliographique il nous a paru intéressant d'appliquer ou du moins en partie les informations recueillies. De ce fait l'étude de cas s'impose et pour des raisons de disponibilité de donnée nous avons choisi comme aire d'étude le périmètre du Haut cheliff.

I. Présentation du périmètre du Haut Cheliff :

I.1 Situation géographique

Le périmètre du haut Cheliff est situé à 120[*km*] à l'ouest d'Alger, et à 40 km à vol d'oiseau de la mer. Il recouvre une superficie de 37000 ha constitué en fait de deux plaines, séparées par le massif du Doui.

- ❖ Plaine d'El Khemis.....25700 ha
- ❖ Plaines d'El Abadia.....11300 ha

Notre attention sera portée essentiellement sur la plaine d'El Khemis, la plus importante .

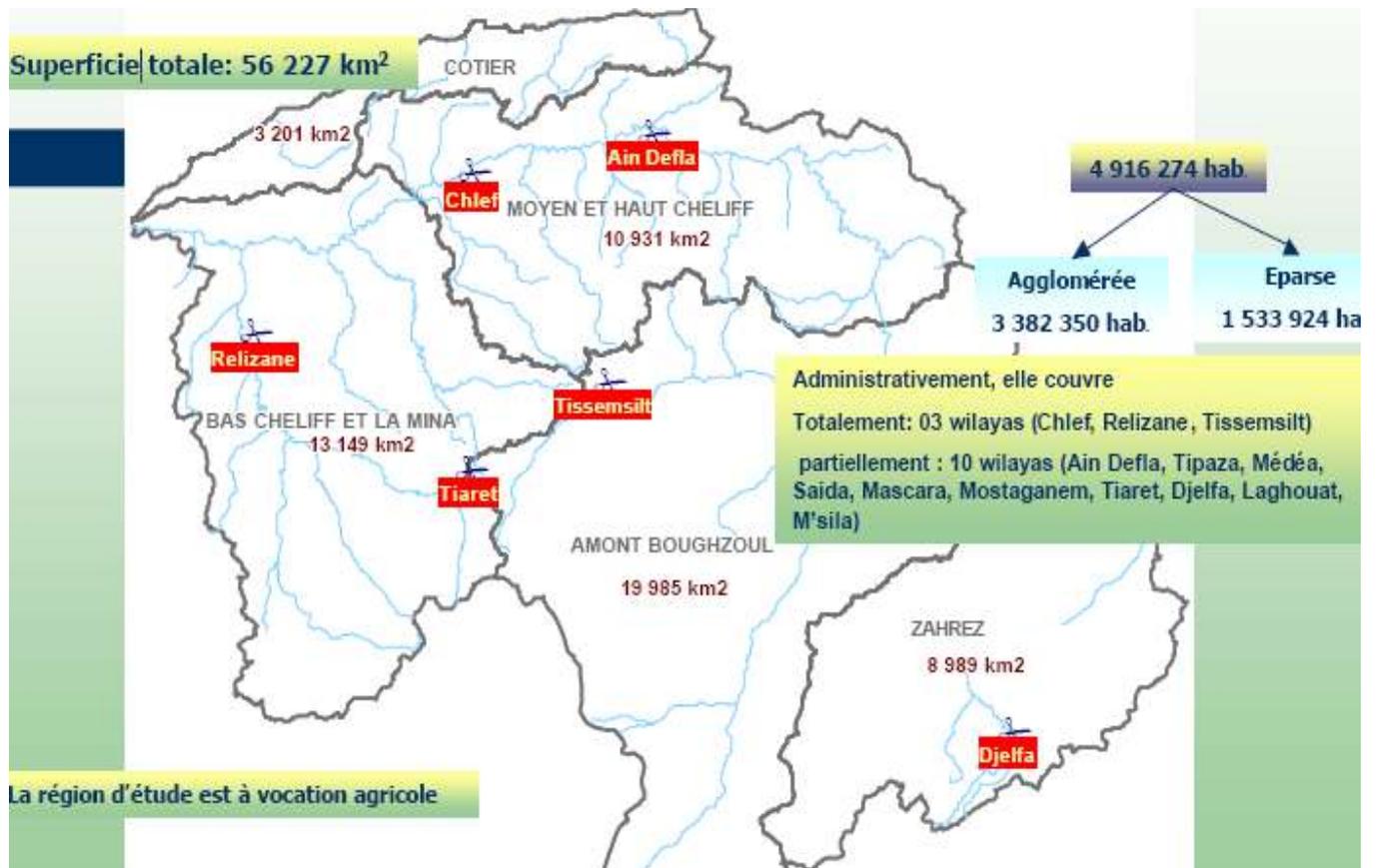
I.2 La plaine d'El Khemis :

La plaine d'EL KHEMIS se situe à 120[*km*] à l'ouest d'Alger, elle fait partie du grand bassin du Chélif. Le Chélif qui la traverse d'est en ouest représente l'oued le plus long d'Algérie avec 700[*km*]. Elle s'étend au pied massif de Zaccar qui culmine au Nord à 1500m d'altitude et à l'Est le massif du Gantas dominant à 871[*m*] d'altitude. Les reliefs sont beaucoup plus abrupts au Nord qu'au Sud de la plaine ou les premiers contreforts de l'Ouarsenis ont un relief relativement collinaire. Les bas des pentes de ces collines sont souvent couverts par des alluvions anciennes de point de vue géomorphologie. La plaine de pente relativement faible est bordée au Nord par des cônes de déjection qui constituent la zone de transition entre la vallée et la montagne (pente 15%). Ces cônes sont particulièrement étendues et important au Nord Ouest dans la région des Arribs et Sud Ouest au pied du massif de Doui. Les seuils de Djendel et du Doui représentent respectivement les limites Est et Ouest de la plaine celle ci constitue l'axe de drainage principal.

I.3 Aperçu historique sur les plaines du Haut Cheliff :

Isolée par la mer et le désert par des structures en bandes parallèles au nord et au sud. Les premières transformations importantes relatives à cette région ont débuté après 1830, début de l'époque Française. En effet, l'eau et la terre présent en abondance donnèrent lieu à un important projet de mise en valeur, visant à exploiter ces ressources et les utiliser d'une manière abusive. Cette phase s'est soldée par la construction des barrages au long des plaines. Dont le Ghib à El Khemis en 1943, qui vise à réaliser le maximum de rendement, sans soucis des conséquences que peut engendrer une telle conduite des opérations. Le mauvais aménagement opère sur le sol par l'homme, et cumulé année par année commence à se manifester par un signe de dégradation : la salinisation qui causait de grands dommages dans les plaines de Mohammadia et Relizane, semble également se déclencher à El Khemis.

Figure N°18 :Schéma de représentation du Haut Cheliff



II. Climatologie :

Les différents composants du climat sont les précipitations, la température, le vent, l'évaporation etc....

II.1 Pluviométrie :

II.1.1 Pluviométrie moyenne annuelle :

Elle est d'un régime variable et irrégulier suivant les mois et les années. Pluviométrie moyenne mensuelle sur une période d'observation de 30 ans (1975-2005) à la station d'El KHEMIS.

Mois	P(mm)
septembre	19,83
octobre	36,43
novembre	51,86
décembre	54,92
janvier	61,95
février	58,66
mars	46,55
avril	41,55
mai	32,68
juin	10,35
juillet	3,82
août	5,88
année	424,48

**Tableau N°19: pluviométrie moyenne mensuelle en mm.
(Source : station météorologique d'El KHEMIS)**

II.1.2 Température :

Les relèves moyennes mensuelles des températures sur une période de 30 ans (1975-2005) sont portées dans le tableau suivant :

Mois	Se p	Oct	No v.	Dé c.	Ja n	Fé v.	Ma rs	Av ril	Ma i	Jui n	Juil .	Ao ût	Annu elle
T° _{moy} (°C)	25,8	20,74	14,48	10,4	8,76	10,9	12,8	16,0	21,1	26,34	25,48	30,08	19,00
T° _{min} (°C)	19,7	15,5	10,39	6,22	5,13	6,24	8,13	10,3	14,4	19,58	23,8	22,94	13,53
T° _{max} (°C)	32,0	25,98	18,57	14,5	12,4	15,6	17,6	21,7	27,8	33,11	37,16	37,22	24.47

Tableau N°20 : Température moyen mensuelle.
(Source : station météorologique d'El Khemis)

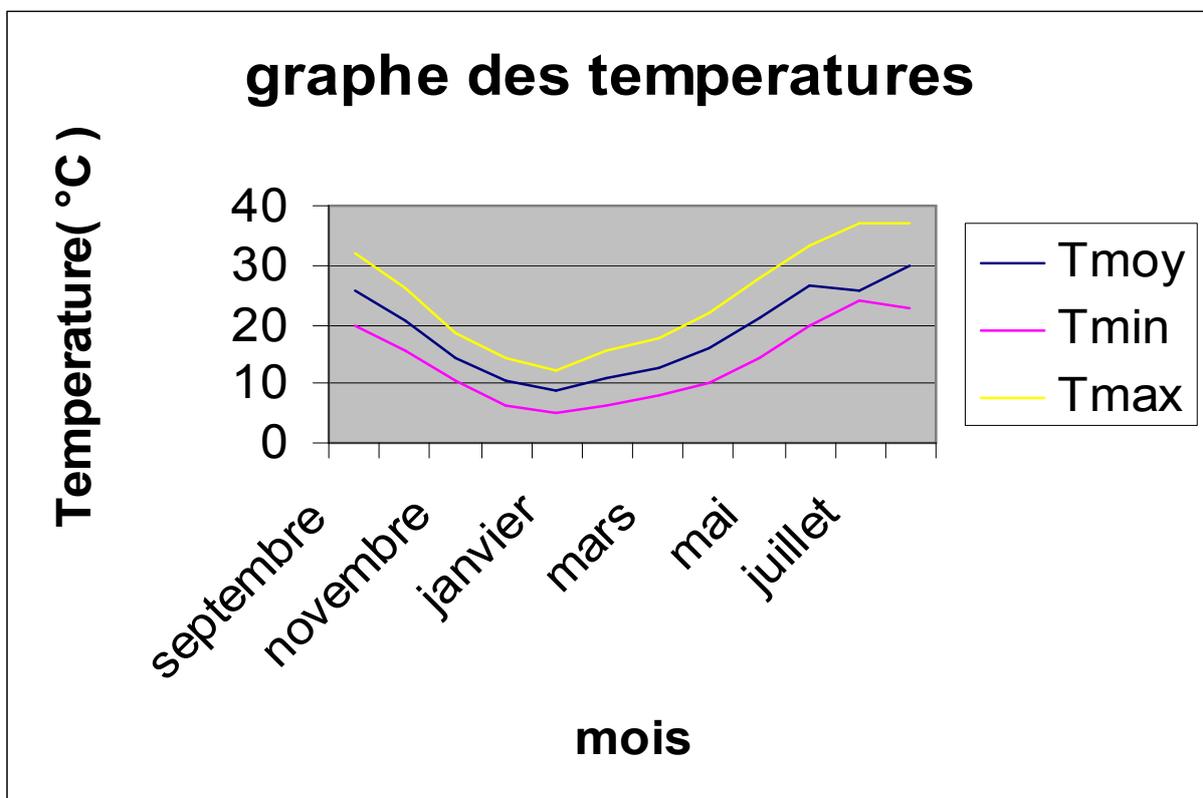


Figure N° 19 : graphe des températures

II.1.3 Régime thermique :

On constate que le climat du haut Cheliff a un caractère de continentalité très marqué.

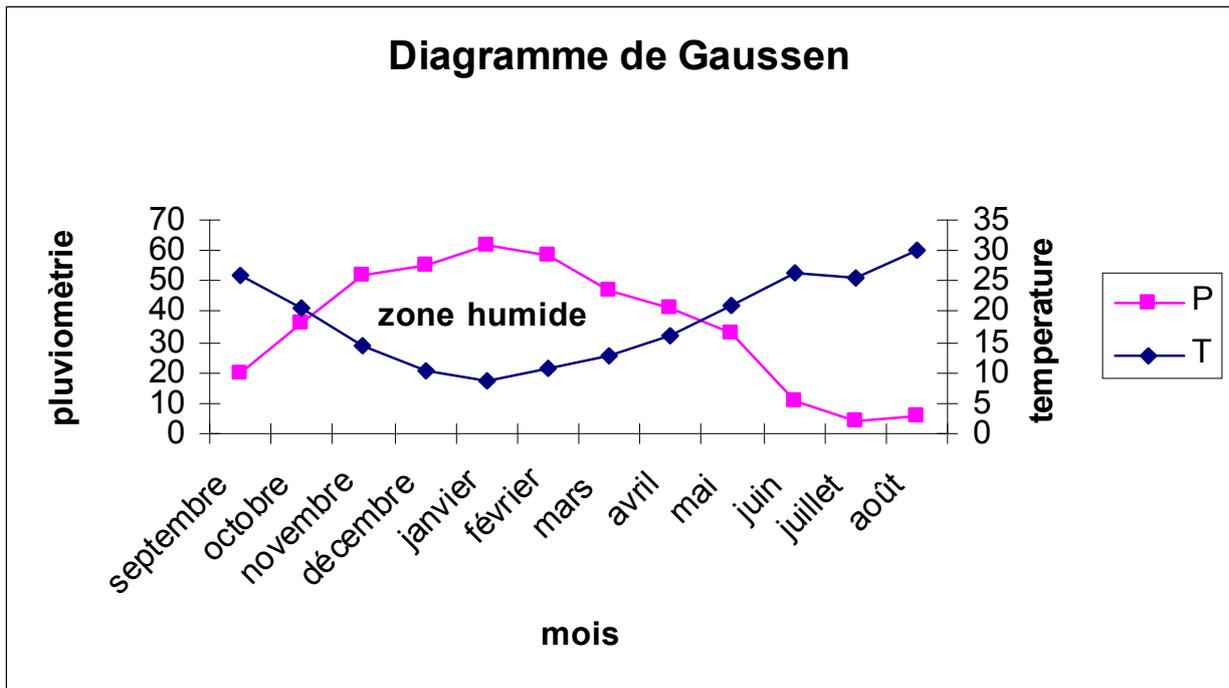


Figure N°20 : Diagramme de Gausse

La période sèche dépasse les 6 mois, ce qui confirme le caractère semi-aride de cette zone.

II.1.4 Vent :

Les vents de la région d’El KHEMIS sont très fréquents et dont la vitesse varie entre 0.5à 2.5m/s

Leur direction varie avec la saison.

En hiver les vents dominants sont de direction Ouest.

En été les vents dominant sont de direction Est.

Le maximum des forces des vents se situe au cours de l’été et le minimum se situe en hiver.

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août
V (m/s)	2,04	1,67	1,52	1,54	1,41	1,64	1,85	1,66	1,90	2,44	2,61	2,28

Tableau.N°21 : vitesse de vent en m/s sur une période d’observation de 30 ans (1975-2005)

II.1.5 Gel :

Les gelées commencent du mois de novembre jusqu’au mois d’avril, le maximum du nombre de jour de gelées est au mois de janvier.

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août
Nombre de jours	0	0	1,3	4,6	5,4	2,4	1,00	0.40	0	0	0	0

Tableau N°22 : Nombres de jours de gelée sur une période d'observation de 30 ans (1975-2005).

II.1.7 Evaporation :

L'évaporation est le phénomène qui est en relation directe avec la température de l'air et du sol. Plusieurs méthodes de mesure de l'évaporation sont utilisées à la station d'El Khemis, nous signalons qu'il s'agit de l'évaporomètre du piche, du Bac Colorado et du bac classe A. A la station expérimentale on préconise l'utilisation du bac classe

m ois	sep	oct	nov	dec	jan	fev	mar s	av	mai	jui	juill.	Ao u
ET	134	100	59,	75,	76,	102	140	206	260	344	344	23
P	.54	.02	34	95	56	,03	,00	,10	,20	,66	,20	3.6

Tableau N°.23 : Moyenne mensuelle de l'évaporation sur une période d'observation de 30 ans (1975-2005) .

II.1.8 Humidité relative :

L'humidité relative moyenne annuelle de l'air est de 67%. La plus grande humidité relative de l'air pendant la période hivernale atteint la valeur de 86.3%, et la plus petite valeur pendant la période estivale atteint 40.7%.

mois	se p	oct	no v	dec	jan	fev	mar s	av	mai	jui	juill .	Ao u
Humid ité %	79, 6	81, 9	77	68, 46	71, 66	60, 93	44, 03	52, 33	71, 33	75, 53	83, 03	89, 3

Tableau N°24: Les valeurs de l'humidité relative de l'air sur une période de 30 ans (1975-2005).Source : Station météorologique d'EL KHEMIS

II.1.9 Brouillard :

C'est un facteur climatique aussi fréquent que la pluviométrie, dont l'intensité varie dans le temps. On remarque que la durée maximale du brouillard correspond aux mois les plus froids (décembre et janvier).

mois	sep	oct	nov	dec	jan	fev	mars	av	mai	jui	juill.	Aou
Brouillard /jours	0,2	1,2	2,9	5,2	4,1	2,8	2,3	0,8	1,3	0,4	00	00

Tableau N°25: Nombre moyen de jours de brouillard sur une période de 30 ans (1975-2005)

II.1.10 Insolation :

L'insolation est la période durant laquelle le soleil brille sur le sol

mois	sep	oct	nov	dec	jan	fev	mar	av	mai	jui	juill.	Aou
heure	12,4	11,3	10,3	9,8	10,1	11	11,9	13,1	14	14,5	14,3	13,5

Tableau N°26 Moyenne mensuelle de l'insolation (latitude 36°) de 1991-1997

II.1.11 Indice climatique :

II.1.11.1 Indice d'aridité de Martonne :

Il permet de connaître le degré de sécheresse de la région

$$I_A = \frac{P}{T + 10} \dots\dots\dots\{1.1\}$$

Avec :

I_A : indice climatique.

P : précipitation moyenne annuelle (mm).

T : température moyenne annuelle (°C).

$$I_A = \frac{424,47}{19 + 10} = 14,63$$

$$I_A = 14,63$$

Valeur de I_A	Type de climat	Irrigation
$I_A \leq 5$	Désertique	Indispensable
$5 < I_A \leq 10$	Très sec	Indispensable
$10 < I_A \leq 20$	Sec	Souvent indispensable
$20 < I_A \leq 30$	Relativement humide	Parfois utile
$I_A > 30$	Humide	Inutile

Tableau 27: Limite des climats d’après l’indice climatique de Martonne.

$I_A = 14,63$ donc $10 < I_A \leq 20$

- D’où notre climat est sec, donc l’irrigation est souvent indispensable.

II.1.11.2 Quotient pluviométrique d’EMBERGER :

Le quotient pluviométrique d’EMBERGER exprime la sécheresse globale d’un climat en faisant la comparaison entre la consommation en eau et

l’apport par le rapport $\frac{P}{E}$.

$$Q = \frac{P}{M^2 - m^2} \dots\dots\dots \{1.2\}$$

Avec :

P : précipitation moyenne annuelle (mm).

M : maximum des températures maximales (Kelvin).

m : minimum des températures minimales (Kelvin).

$M = 37,22 + 273 = 310,22^\circ K \dots\dots\dots \{1.3\}$

$m = 5,13 + 273 = 278,13^\circ K \dots\dots\dots \{1.4\}$

A.N :

$$Q = 2000 \cdot \frac{424,47}{(310,22)^2 - (278,13)^2} = 44,96$$

*D’après le diagramme bioclimatique d’EMBERGER (voir Figure (38)), on peut dire le climat de notre région est un climat semi-aride.

Figure N° : Climogramme pluviométrique d’Emberger voir

(Annexe N° 10)

III. Hydrologie :

III.1 Les eaux superficielles :

Le nombre assez important d'oueds dans la région, fait que cette région a d'importantes potentialités en eaux superficielles, l'eau des barrages de la région est destinée à l'irrigation du périmètre de Haut Chelif

Tableau N°28 : salinité moyenne des eaux du barrage de Deurdeur

Périmètre	Barrage	C.E.	S.A.R.	Classe Riverside	Qualité
Haut Chelif	Ghrib - Deurdeur	2.92	5.42	C4S1	Médiocre

Source ANRH 2000

La composition chimique de l'eau dans la partie amont du périmètre est représenté dans le tableau ci-dessous :

Tableau N°29:composition chimique de l'eau de l'oued

Ce en mmho/cm	3,1
PH	7,5
Ca ⁺⁺	9,8
Mg ⁺⁺	7,4
K ⁺	0,2
Na ⁺	17
Cl ⁻	14,3
SO4 ⁻	16,9
HCO3 ⁻	2,5
NO3 ⁻	0,1
SAR	5,8
Classe	C3S1

Source laboratoire de l'ANRH d'Alger

IV. Géologie :

La plaine du Haut Chelif correspond a une zone déprimée a sédimentation récente mioplio-quaternaiee. Elle est traversée d'Est en Ouest par l'oued Chelif qui entre dans la plaine par une ligne de reliefs que forment le Djebel Gontass (81m) le massif de Zaccar et des Arribs, elle appartient

au Tell Septentrional. La partie Sud est limitée par les premiers contreforts de l'Ouarsenis, elle appartient au Tell Méridional.

Les pointements jurassico-primaires de Zaccar Doui et Arribs constituent l'autochtone épinéomorphique à schistosité ante-nappe sur lequel repose l'allochtone caractérisée par des nappes de charriage à matériel crétacé. Ces nappes venant du Nord se sont mises en place du Miocène inférieur. Le bassin du Haut Chélif correspond à un sillon intra-montagneux subsidence dans lequel l'érosion des reliefs environnants et les transgressions successives ont permis les dépôts de fortes épaisseurs de sédiments néogènes et quaternaires.

V. Hydrogéologie :

Le massif du Zaccar d'âge jurassique et le massif du Doui primaire et jurassique forment des pointements autochtones de tectonique complexe et relativement mal connue qui bordent le bassin du Haut Chélif. Après la mise en place des nappes de charriages venant du Nord il y a eu formation des bassins sédimentaire du Haut Chélif, une phase de compression de direction moyenne a engendrée la formation de plis secondaires et l'allongement des bassins du Chélif.

V.1 Le Miocène Inférieur :

Les bassins subsidences du Chélif s'individualisent, celui du Haut Chélif en particulier se comporte comme un synclinorium bordé par les massifs rigides à tectonique cassante du Zaccar et du Doui.

V.2 Le Miocène Supérieur :

Les massifs bordiers se remettent à jouer le long de failles et de flexures. Le Zaccar et le Doui se dressent davantage. Au centre du miocène supérieur est marquée par une nouvelle transgression vindolienne. Dans la majeure partie du bassin le miocène succède en continuité de sédimentation au miocène inférieur. Le miocène traduit un changement net dans l'histoire du Haut Chélif celui-ci tend en effet à s'isoler des autres bassins du Chélif pour évoluer en golfe ou estuaire qui se comblera peu à peu par des sédiments détritiques. La fin du miocène supérieur se

caractérisé par une reprise de l'érosion et dépôt de grés avec des intercalations marneuses.

V.3 Le Pliocène :

Les reliefs très élevés se comportent en barrage empêchant la mer pliocène de pénétrer dans le bassin d'El Khemis.

V.4 Le Quaternaire :

Le quaternaire est discordant sur les terrains néogènes. La plaine d'El Khemis s'est entièrement creusée dans le miocène supérieur. Et c'est en partie avec les matériaux qui en proviennent qu'elle a été remblayée. Les alluvions quaternaires sont donc d'un grand intérêt hydrologique du fait de leur porosité.

V.5 Caractéristiques hydrogéologiques de la nappe alluviale de Haut Chélif :

Lithologie :

La nappe alluviale du haut Chélif est constituée principalement par un dépôt détritique renfermant des galets, graviers, sables et argiles. Ces formations déposées en alternance varient localement avec un dépôt grossier constitué de galets et graviers intercalé par des bancs minces d'argiles avec une gamme importante en rive droite et suivant l'axe de l'Oued Chélif, réduite au fur et à mesure qu'on s'éloigne du centre et en particulier vers la bordure sud. Les dépôts grossiers sont surmontés par une alternance de bancs de graviers moyens et fins et de graviers argileux. Cette couche gravleu-argileuse est bien développée sur les bordures de la nappe. Le tout est couvert par une couche limoneuse-argileuse, ce qui confère au caractère captif, sauf au centre oriental et au Sud où l'épaisseur de celle-ci est réduite, donc la nappe devient libre à semi captive. Les différentes caractéristiques des formations aquifères sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau n°30: les différentes caractéristiques des formations aquifères

Horizons aquifères	Age	Epaisseur (m)	Débit moyen L/S	Types De nappes	Types De porosité	Intervalle de perméabilité	Obs.
Alluvions	Quaternaire	150	50	Libre	Interstices Et Chenaux	$(8 \text{ à } 10) \cdot 10^{-4}$	-
Grés et poudingues	Mio-plio-Quaternaire	1500	40	Captive	Interstices	$(3 \text{ à } 5) \cdot 10^{-5}$	-
Schistes et quartzites	Crétacé	450	-	-	Fractures	$(3 \text{ à } 5) \cdot 10^{-5}$	Quand L'épaisseur des quartzites est importante
Calcaires fracturés et Karstifiés	Jurassique	700	50	Libre	Fractures et Karst	$(3 \text{ à } 5) \cdot 10^{-5}$	-

VI. Pédologie :

VI.1 généralité sur les sols de la plaine :

l'étude pédologique de la plaine a été réalisée par J-Boulaine. Il s'agit des sols alluviaux et colluviaux de texture variables avec cependant prédominance de texture fines argileuses ou argilo-limoneuses. La plupart des sols sont calcaires dans l'ensemble de leur profil. Cependant les sols très évolués situés en bordure de plaine sont partiellement ou totalement décalcifiés. A part des sols formés sur bourrelet de berges à texture plus grossière la perméabilité est généralement faible. La nappe phréatique se situe en général à une profondeur assez grande. Dans la partie Nord-ouest de la plaine la nappe est proche de la surface Marais D'EL ARIBS.

Tableau N°31: granulométrie-caractéristiques hydriques d'un sol

caractéristiques	0- 20 cm	20- 40 cm	40- 60 cm	60- 80 cm	80- 100cm	100- 120cm	120- 140cm	140- 160cm
Argile %	44	42	43	40	36	35	30	21
Limon %	32	32	34	35	40	38	34	20
Sable très fin %	12	13	13	13	15	15	12	8
Sable fin %	7	8	5	7	6	7	8	8
Sable grossier %	5	5	5	5	3	5	16	44
Densité réelle	2,64	2,61						
Densité apparente	1,5	1,7						
Humidité.pf2.5%P	30,4	30						
Humidité.pf3.0P	27,2	24,9						
Humidité.pf.4,2P	16,1	15,7						
Stabilité structurale Is	8,3	9,6						

Analyse effectué par le laboratoire des sols de la DEMRH

VII. Etude de la Piézométrie :

L'étude piézométriques s'est déroulée en 1968 et en 1973. donc nous disposons de 6 années d'observation de la piézométrie, cependant toutes les données nécessaires ne sont pas complète car soit les piézomètres sont cassés, soit les puits sont bouchés.

VII.1 Les eaux de la nappe

Moins salées que les eaux de l'oued Cheliff, les eaux de nappe alluviales présentent aussi une plus grande stabilité de salinité au cour du temps

Tableau N°32 : composition chimique moyenne des eaux de la nappe

Ce en mmho/cm moyenne	2,5
PH	8
Ca ⁺⁺	5,2
Mg ⁺⁺	4,4
K ⁺	0,1
Na ⁺	4,4
Cl ⁻	5,8
SO ₄ ⁻	5,2
HCO ₃ ⁻	7,4
NO ₃ ⁻	0,1
SAR	2
Classe	C3S1

La recherche bibliographique nous a permis de cerner différents aspects quand à la salinité, il nous a paru intéressant de voir, quel est l'état ou l'évolution de la salinité dans l'aire d'étude choisie.

VIII. Application pratique à un cas

Donnée de départ :

ECW=3,01 mmho/cm conductivité électrique de l'eau d'irrigation

ECs=2,9 mmho/cm conductivité électrique du sol

Type de climat : climat semi-aride d'après le diagramme bioclimatique d'EMBERGER

Technique d'irrigation : l'irrigation par submersion donc $\eta=60\%$

Culture : l'arboriculture (le citronnier)

Absence d'un réseau de drainage

Type de sol : sol argilo-limoneux

VIII. Doses d'irrigation et lessivage :

L'obtention d'un rendement optimale d'une culture est liée à plusieurs facteurs notamment :

- l' état et le travail du sol
- l'état phytosanitaire des sols
- la satisfaction des besoins en eau des plantes.

Ces derniers facteurs sont très important et très délicats à maîtriser car en fait, ils dépendent aussi de plusieurs autres élément tel que, la réserve utile du sol, le climat, l'état ou stade physiologique de la plante etc.

D'après le logiciel cropwat 4W3 de la F.A.O nous avons les besoins de pointe du citronnier ci-dessous :

Tableau N°33 :les besoins et volumes d'eau délivrés aux cultures

spéculation	Besoins en eau (m ³ /ha)	Dose d'irrigation	Déficit (m ³ /ha)	%
citronnier	800	400	400	50

Le citronnier :

Le volume d'eau délivré aux agrumes à chaque irrigation est de 800 à 900 m³/ha, avec le rendement d'application la dose brute sera :

$$\text{❖ Pour } 800 \text{ m}^3/\text{ha} \quad D_{\text{brute}} = \frac{800 \times 100}{60} = 1333,33 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$\text{❖ Pour } 900 \text{ m}^3/\text{ha} \quad D_{\text{brute}} = \frac{900 \times 100}{60} = 1500 \text{ m}^3/\text{ha}$$

La quantité d'eau perdue serait donc de :

- **Premier cas** : $1333,33 - 800 = 533,33 \text{ m}^3/\text{ha} \approx 533 \text{ m}^3/\text{ha}$

Sur ces $533 \text{ m}^3/\text{ha}$, les pertes par percolation (R) sont estimées par :

$$R = 0,3. D_{\text{brute}} = 0,3.1333,33 = 399,99 \text{ m}^3/\text{ha} \approx 400 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Et les $133 \text{ m}^3/\text{ha}$ restant se perdent par ruissellement et par évaporation direct.

- **Deuxième cas** : $1500 - 900 = 600 \text{ m}^3/\text{ha}$

Sur ces $600 \text{ m}^3/\text{ha}$, les pertes par percolation (R) sont estimées par :

$$R = 0,3. D_{\text{brute}} = 0,3.1500 = 450 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Et les $150 \text{ m}^3/\text{ha}$ restant se perdent par ruissellement et par évaporation direct.

VIII.1 Calcul de la dose de lessivage d'entretien :

afin d'éviter d'éventuels problèmes de salinisation des sols, il nous paraît très important de calculer les doses de lessivages nécessaires pour notre sol.

La fraction de lessivage : c'est un complément d'eau d'eau qu'on ajoute à chaque irrigation pour diluer les sels.

Formule de Rhoades :

$$L_R = \frac{E_{C\omega}}{5E_{CR} - E_{C\omega}}$$

Avec

$$E_{C\omega} = 3,01 \text{ mmho/cm} \quad (\text{eau d'irrigation})$$

$$E_{CR} = 2,3 \text{ mmho/cm} \quad \text{pour les agrumes (le citronnier).}$$

$$L_R = \frac{3,01}{5 \times 2,3 - 3,01} = 0,35 \approx 35\%$$

La quantité d'eau nécessaire :

Le type d'irrigation est l'irrigation par submersion donc l'efficent est :

$$\eta_{\text{submersion}} = 60\%$$

ETP = 80 mm

Donc la quantité d'eau nécessaire pour irriguer et lessiver est :

$$Q_{net} = \frac{ETP}{1 - L_R}$$

$$Q_{net} = \frac{80}{1 - 0,35} = 123,08 \text{ mm / irrigation}$$

❖ La dose brute est :

$$D_{brute} = \frac{D_{nette}}{\eta} = \frac{80}{60} \times 100 = 133,3 \text{ mm}$$

On a donc $Q_{net} = 123,08 \text{ mm} < D_{brute} = 133,3$ alors on lessive sans le savoir.

IX. Etude de la vulnérabilité des sols par rapport à la Salinité

Analyse des conditions naturelles :

Tableau N° 34 : Variation de la pluviométrie dans le Haut Cheliff DURANT 6 ANS :

mois	Pluviométrie (mm)					
	1968	1970	1973	1999	2003	2005
janvier	0,3	6,5	15,2	16,2	1,7	9,9
février	2,4	8,5	2,8	15,3	28,4	60,9
mars	46,6	1	6,8	32,9	58,7	50,5
avril	82,6	43,1	85,7	84,8	62,9	70,7
mai	50,3	95,2	1,9	2,5	35,2	41
juin	73,9	8,3	100,4	0	32,5	70
juillet	35,3	72,4	143,5	4,1	26,3	17,9
août	54,9	53,7	119,2	18,1	22,8	8
septembre	4,6	51,4	5,2	2	46,6	39
octobre	19	12,6	23,5	0,7	1,4	2,7
novembre	0,4	1,5	0,1	0	0	0
décembre	1,7	0	0,1	0	2,1	3,9

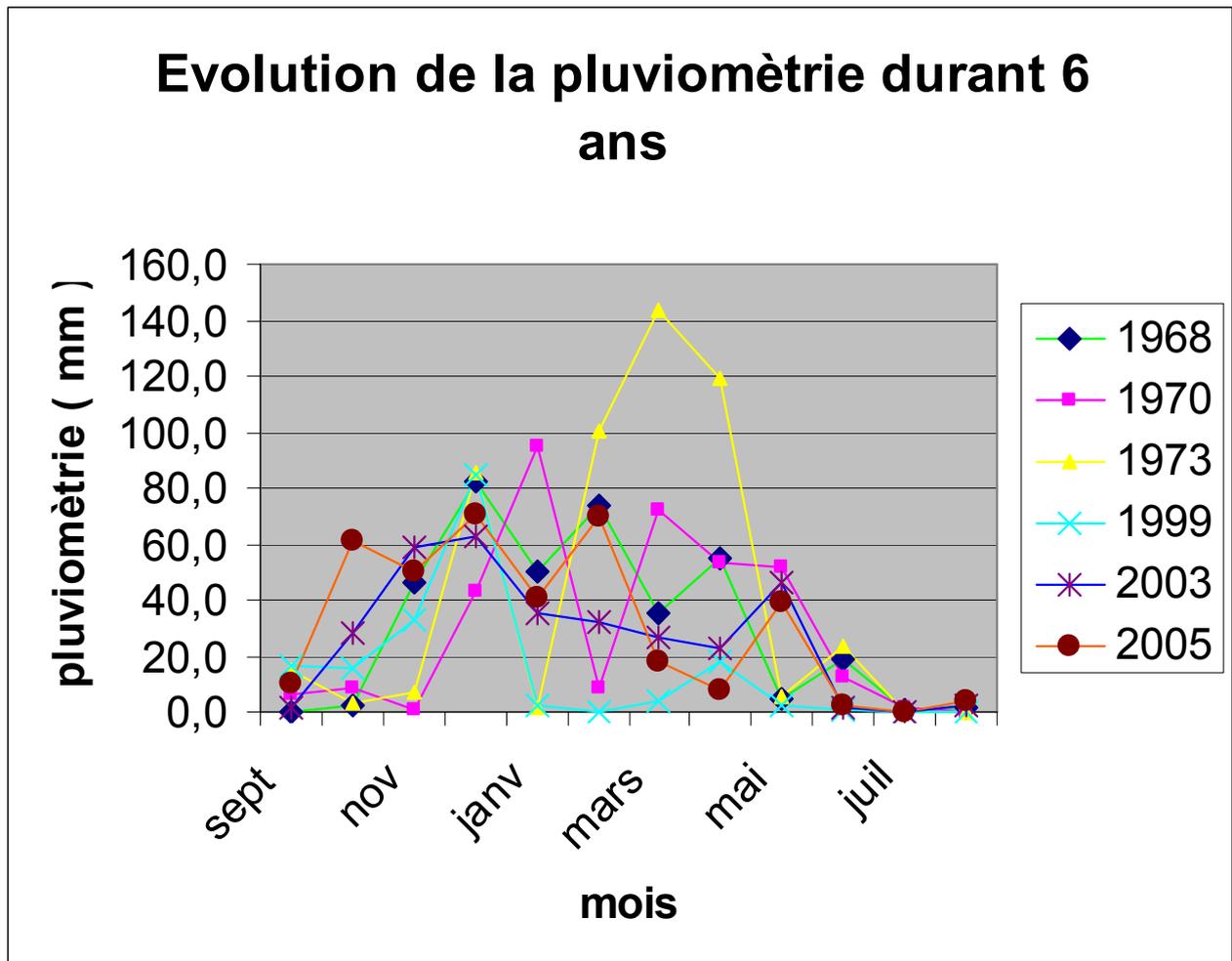


Figure N° 21: Evolution de la pluviométrie durant 6 ans

Interprétation :

L'analyse du graphe montre une tendance évolutive vers la sécheresse, très marqué surtout pour les mois de Février, Mars, Avril et Mai. Ceci entraînera probablement une baisse de réserve en eau superficielle, ce qui contraindra les agriculteurs à utilisés les eaux souterraines.

Tableau N° 35 : Variation de la conductivité et du SAR dans le Haut Cheliff DURANT 6 ANS :

MOIS	CE (mmho/cm)					
	1968	1969	1970	1971	1972	1973
janvier	-	1,5	2,1	1,3	-	-
février	-	1,5	2	1,4	-	-
mars	-	1,3	2	1,4	2,1	-
avril	-	1,5	2,2	1,1	2,3	2
mai	2,3	1,6	2,2	1,8	2,3	2
juin	2,5	2,5	2,3	2,9	2,3	2,2
juillet	2,5	2,5	2,3	3,1	2,3	2,2
août	2,7	2,5	2,3	3,2	2,3	2,3
septembre	2,4	2,7	2,4	3,1	2,5	2,3
octobre	2,6	2,5	2,6	3,1	2,6	2,6
novembre	2,3	2,6	2,8	3	2,5	2,5
décembre	1,4	2,1	2,7	-	-	-

MOIS	SAR					
	1968	1969	1970	1971	1972	1973
janvier	-	2,4	3,3	3	-	-
février	-	2,9	3,7	2,8	-	-
mars	-	2,2	3,3	2,8	3,6	-
avril	-	2,9	4,3	3,7	3,5	3,6
mai	-	3,5	4,4	3,3	3,6	3,1
juin	-	4,9	4,1	5,6	3,5	4
juillet	4,4	5	4,2	5	3,5	3,4
août	4,4	4,9	4,2	5,1	4,2	3,6
septembre	4,4	5,4	4,4	5,2	4,2	3,8
octobre	5	3,2	4,8	5,8	4,2	4,1
novembre	4,3	4	4,8	5,7	4	4,1
décembre	2,5	3,9	4,8	5,7	4	4,1

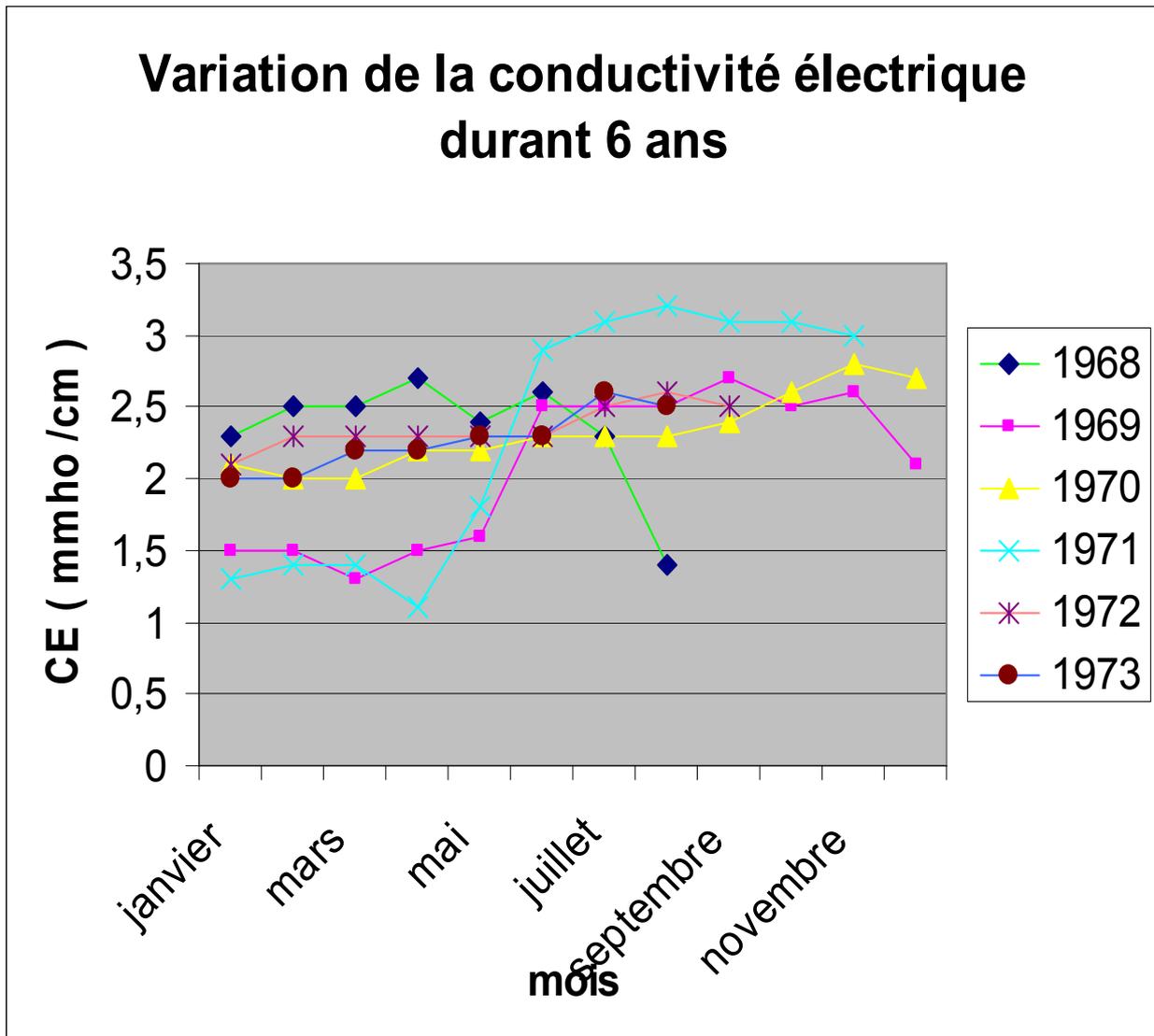


Figure N°22 : Variation de la conductivité électrique

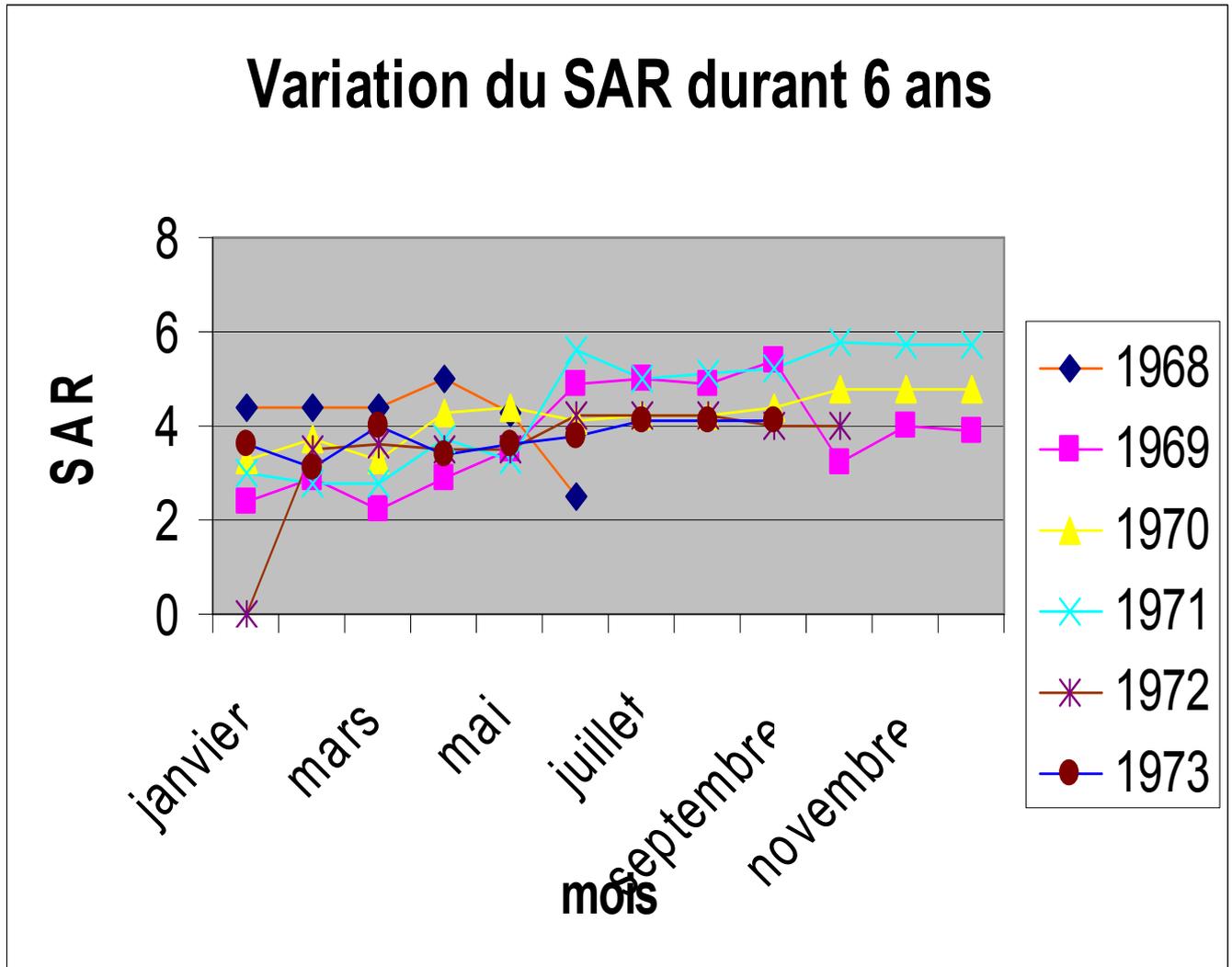


Figure N°23 : Variation du Sar

Interprétation :

- ❖ Pour la conductivité électrique les seuls donnés disponibles sont sur 5 ans, il est donc impossible de faire une interprétation rigoureuse à partir de ces 5 années de données.
- ❖ Pour le SAR, l'évolution n'est pas assez important et est presque constant.

Interprétation :

L'analyse pluviométrique nous montre un déficit hydrique de plus en plus important donc l'irrigation se fera à partir des forages existant dans le périmètre dont la qualité de l'eau est résumé dans un tableau voir

(**Annexe N° 11**).

Une représentation graphique de ces résultats se trouvent présente ci après :

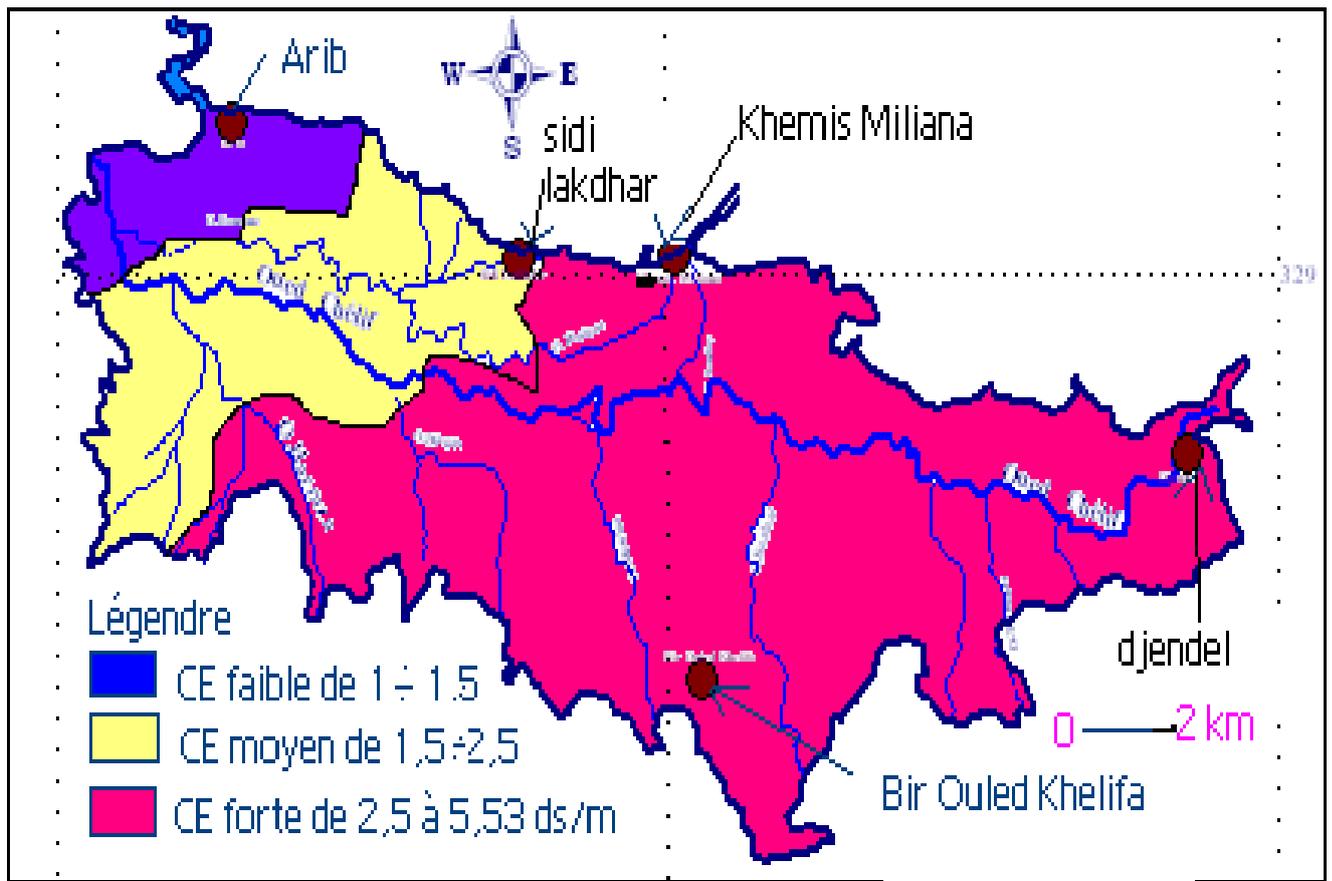


Figure N°23 :Vulnérabilité des sols du périmètre du Haut Cheliff face à la salinisation (conductivité électrique)

Elle représente la délimitation des zones où la vulnérabilité vis-à-vis de la salinité est très probable. On constate que dans la partie est du Haut Cheliff entre Djendel et Khemis Miliana seront très probablement affectés d'une salinisation secondaire due à l'irrigation. Alors que la zone des Arib sera la moins affectée par ce problème vu les faibles valeurs de la conductivité électrique de l'eau souterraine.

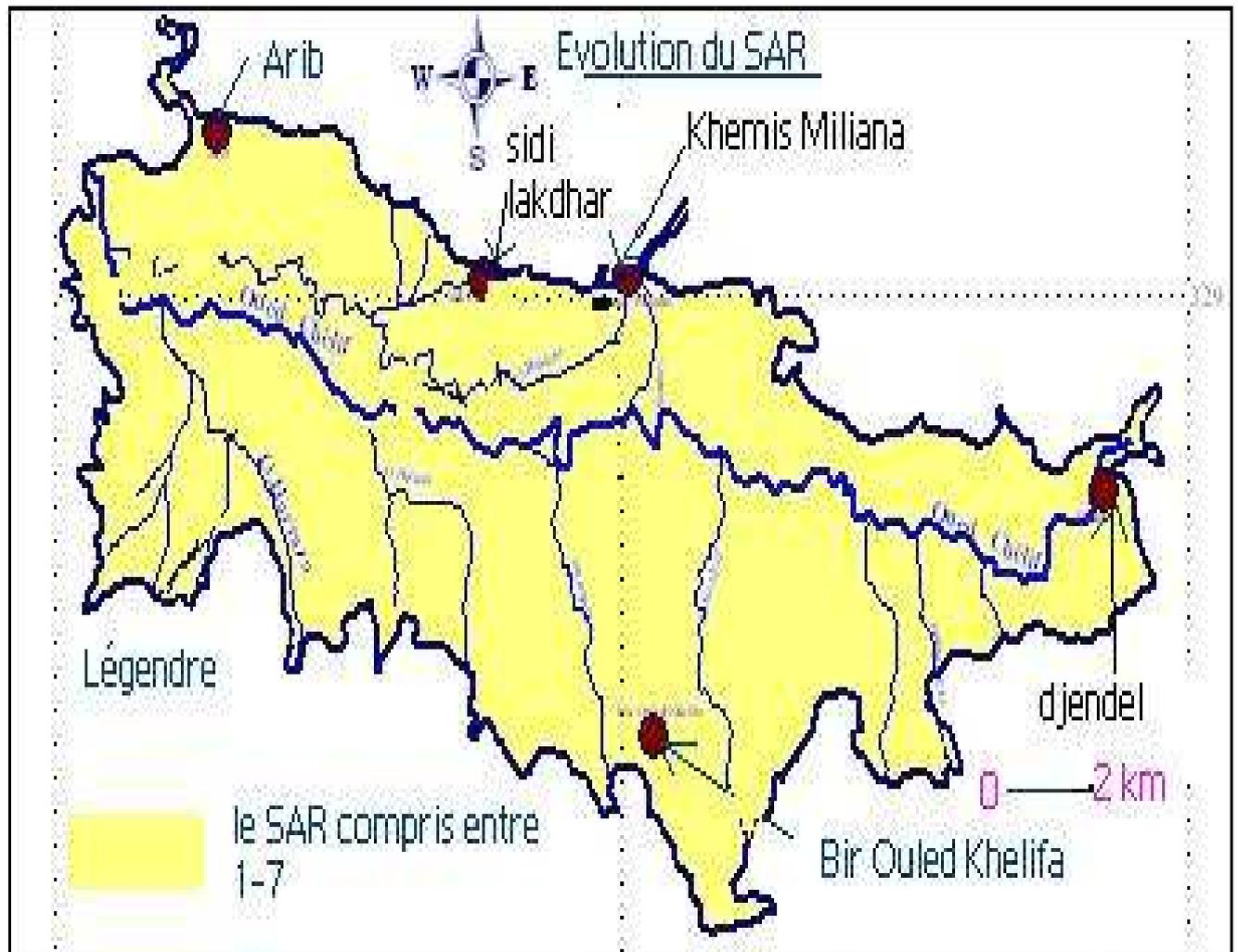


Figure N°24 :Vulnérabilité des sols du périmètre du Haut Cheliff face à la à l'alcalinisation (SAR) par rapport à l'eau souterraine :

Interprétation :

Conformément au calcul de l'eau souterraine et de l'eau superficielle le risque d'alcalinisation ne se manifeste pas pour le moment car les valeurs du SAR est compris entre 1- 7.

IX.1 Autre présentation graphique à partir du SURFER (un logiciel)

Figure N°24 :Vulnérabilité des sols face a la Conductivité électrique (CE)

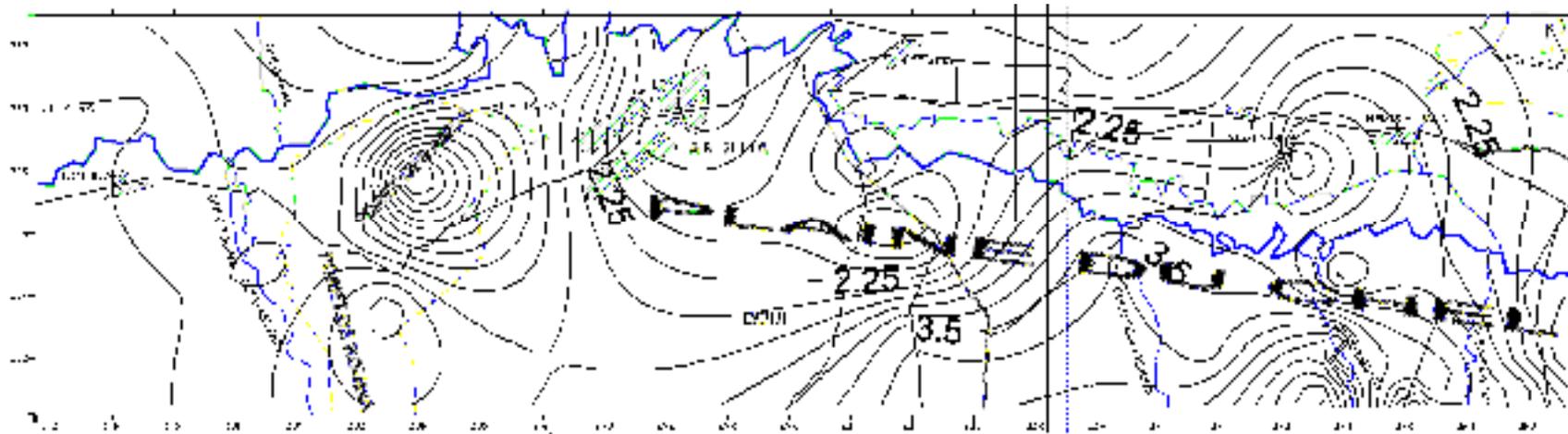


Figure N°25 :Vulnérabilité des sols face au SAR

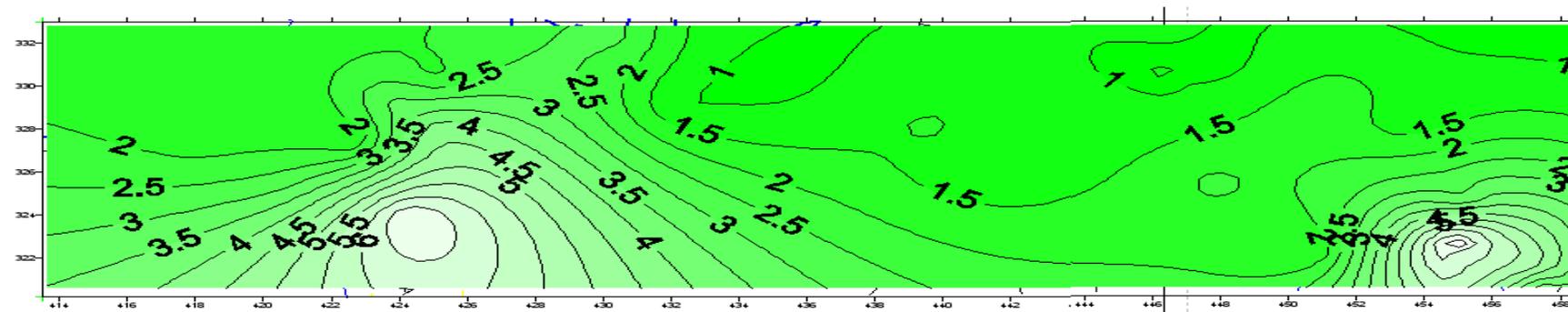
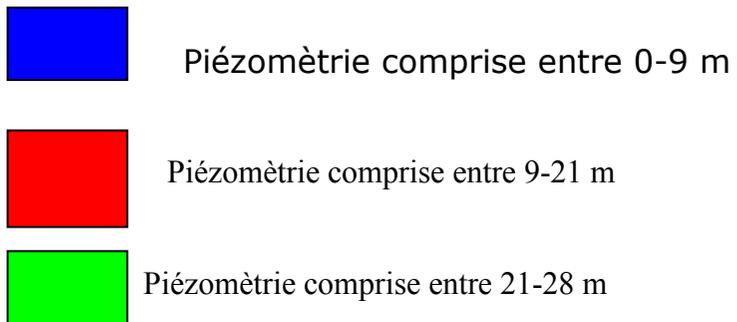
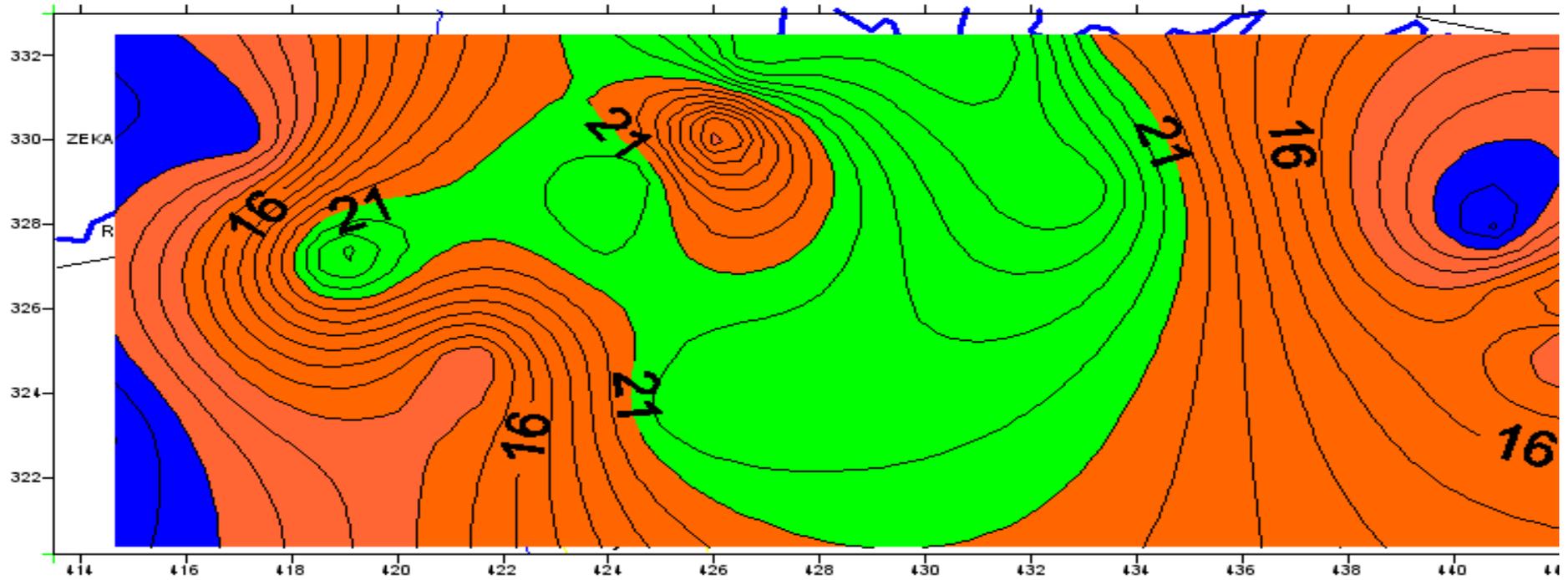


Figure N°26 : Niveau piézométrie moyenne de la nappe phréatique



Elle permet aussi de visualiser les zones à hautes risques de salinisation en tenant compte cette fois-ci du niveau piézométrique de la nappe. En effet une faible profondeur de la nappe contribuera à l'augmentation du risque de salinisation par le phénomène de remontée capillaire sous climat semi-aride. La vitesse de salinisation ne peut être qu'élevée (les sols étant très fortement argilo limoneux).

Ces cartes permettent d'établir un contact quand au risque de salinisation. Quelle procédé devons nous adopter pour éviter éventuellement récupérer ces sols soumis à la salinisation ?

La salinisation est d'ordre secondaire due essentiellement à l'activité humaine. L'utilisation d'eau d'irrigation (souterraine ou superficielle) contribueront en un premier temps de la salinisation du sol. La seule condition qui peut satisfaire est de changer le système d'irrigation. Comme c'est l'arboriculture qui prédomine dans ce périmètre on pourrait aisément passer à l'irrigation localisée et donc préconiser un lessivage d'entretien après chaque récolte. Pour que le lessivage soit efficace sur ces terres argileux des aménagements agricoles doivent être envisager.

- ❖ Apport de matière organique pour alléger la texture ;
- ❖ Des labours pour incorporer cette matière organique , augmenté la perméabilité et permet aussi à l'eau de pluie de participer au lessivage.
- ❖ Un drainage efficace
- ❖ Une surveillance saisonnière de la salinité de l'eau et du sol est indispensable afin de diagnostiquer d'éventuel problème de salinisation, la télédétection est recommandée

X. Conclusion générale de ce chapitre :

Il a été difficile de récolter les données nécessaires à une analyse approfondie de l'évolution de la salinisation au niveau du Haut cheliff. En effet, il n'existe aucune carte pédologie actualisée (la dernière 1973) mais cette dernière est introuvable. Les données climatiques, difficile à recenser, les séries étant incomplètes. La qualité de l'eau d'irrigation (eaux de barrage) insuffisante car la conductivité électrique n'étant pas

mesurer, seuls les paramètres de pollution sont disponibles. Dans les relevés piézométriques disponibles sont ceux de 2000 à 2006, beaucoup de données manquent (piézomètres cassés, forages bouchés etc.).

En général, une étude détaillée et rigoureuse passe en premier par la disponibilité de ces données. Les résultats et interprétation ainsi obtenus dans notre étude restent à conforter et confirmer par des séries de données plus actualisées. Il est important de noter qu'à l'heure actuelle la télédétection, la cartographie assistée par ordinateur (SIG) sont des outils modernes et fiables de surveillance de la salinité. Il serait intéressant de pouvoir les utiliser dans cette région.

N.B : une étude de la désertification a été menée par télédétection au niveau de Djelfa.



Conclusion générale et recommandation

CONCLUSIONS GÉNÉRALES:

Au terme de ce travail, on peut conclure que le risque de salinité oblige à être particulièrement vigilant sur un certain nombre de points et à disposer de données assez précises quand aux conditions climatiques, afin de pouvoir faire les calculs nécessaires. Par exemple, une bonne connaissance des besoins en eau des cultures est un élément nécessaire à l'établissement du programme d'irrigation. La tenue technique des réseaux d'irrigation et éventuellement de drainage doit être l'objet de soins continus. Tout ce qui peut entraîner des percolations inutiles ou gêner l'évacuation des eaux saturantes, doit être évité. Un jaugeage est nécessaire pour travailler rationnellement. L'observation de l'évolution, de la composition chimique des eaux d'irrigations et de drainage doit être prévue.

La salinisation du sol limite considérablement la production des cultures et par conséquent a des effets négatifs sur la sécurité alimentaire. Les conséquences se répercutent à la fois en termes socioéconomiques et environnementaux. La prévention et la mise en valeur des sols salins demandent une gestion intégrée, prenant en considération les aspects socio-économiques, le suivi et l'entretien des périmètres d'irrigation et la réutilisation et/ou la gestion maîtrisée des rejets des eaux de drainage. La pratique d'une irrigation et d'un drainage efficaces, combinée à de bonnes pratiques culturales, peut prévenir et, dans certains cas, réduire la salinisation. Si des mesures appropriées de restauration des sols très fortement salinisés ne sont pas prises à temps, le retrait de la parcelle irriguée de la production est parfois la solution ultime.

Si le comportement de l'agriculteur est fondamental dans les techniques culturales et les stratégies agricoles, il apparaît qu'il ne maîtrise pas toujours les méthodes d'irrigation rationnelle. Il importe de protéger l'environnement des périmètres des sels et de la dégradation des sols. La

problématique de la maîtrise des eaux et des sels peut être résolu si l'on connaît tous les termes du bilan hydrique et salin des périmètres.

Recommandation :

Améliorer la gestion et l'utilisation des terres salinisées, les décideurs, les planificateurs et les producteurs devront adopter une nouvelle attitude. Réduire le degré et l'étendue de la salinisation des sols consiste surtout en un problème de gestion des eaux. Une bonne gestion des ressources en eau implique à la fois que l'on empêche l'eau reçue dans les aires d'alimentation de percoler dans les eaux souterraines et que l'on maintienne à un niveau bas et sûr la nappe phréatique dans la zone d'émergence

Gestion de l'écoulement. : Ensemencer des cultures tolérantes au sel dans les terrains où la gravité de la salinisation est raisonnable

2. Bien identifier :

- Les zones affectées par les nappes phréatiques salées (sodique sélénium)
- Les sols salés (solonetz, solontchaks ...)
- Les zones d'irrigations intensives en zone de forte évaporation
- Ne plus concevoir d'aménagement sans réflexion au niveau du bassin versant.

3. éviter une surexploitation de la nappe surtout en région côtière

4. vérification systématique de la qualité de l'eau d'irrigation avant son application

5. Introduire systématiquement les aménagements de drainage dans tout projet d'irrigation

6. Eliminer les infiltrations d'eau dues aux canaux d'irrigation, aux mares artificielles et aux étangs.

7. Prise en compte des besoins en eau de lessivage lors de l'établissement du projet

- Maîtrise du niveau de la nappe (drainage efficace des eaux de surface et souterraines)

- Réduction de la demande évaporative et des remontées capillaires (rideaux-abri, travail du sol, amélioration de la structure, mulch, etc.)

Et enfin, seule l'expérimentation pourrait conforter les résultats trouvés au niveau des études. En effet la multitude de facteurs aussi bien naturels (climat, sol), socioéconomiques (type d'agriculture) et technique rendent les résultats et recommandation spécifique à chaque zone.

La généralisation notamment en matière d'amendement est assez difficile à extrapoler dans les différentes régions salées compte tenu de toutes des spécificités chimiques des sols.

L'Algérie est un pays semi aride a faible pluviométrie ou les ressources en eau de la surface sont irrégulières et subissent des

Référence bibliographie :

- 1) AMOR BENAMAR (INA, magister 1991) <contribution à l'étude des conditions d'utilisation du phosphogypse dans la mise en valeur des sols salés des plaines du Bas Cheliff >
- 2) ANRH : Etude Agropédologique du haut Cheliff 1971
- 3) BELAICHE ,A (INA mémoire 1987) : < Cartographie et échantillonnage de la salinité des sols (Cas du moyen Cheliff) >
- 4) BRAHIM LAHREH (INA , mémoire 1981) <contribution à l'étude de la salinisation des sols du périmètres irrigué du Haut Cheliff >
- 5) Bulletin F.A.O d'irrigation et de drainage : la qualité des eaux en agriculture.
- 6) CENTRE UNIVERSITAIRES DE CHLEFF : <la salinisation des terres agricoles en Algérie>
- 7) Messahel. M : cahier de cour de la 5^{eme}
- 8) ftp://ftp.fao.org/agl/iptrid/salinity_brochure_fr.pdf
- 9) GILBERT GAUCHER: Géologie, géomorphologie et hydrologie des terrains salés
- 10) horizon.documentation.ird.fr/exldoc/pleins_textes/cahiers/PTP/15440.
- 11) horizon.documentation.ird.fr/exldoc/pleins_textes/cahiers/PTP/18525.
- 12) hydram.epfl.ch/docs/Ma%E2%80%99Etrise%20salinit%E9.pdf –
- 13) LANGUEDOC : étude agro-economique pour le réaménagement des palmeraies de L'OUED R'HIR
- 14) LEGOUPIL J.C (INA Mémoire 1984) <Evolution de la salure du sol sous irrigation>
- 15) MARC HULIN : polycopé de cours sur la salinité
- 16) TIERCELLI JEAN – ROBERT : Traité d'irrigation
- 17) VALLES.V : <Calcul des doses d'irrigations pour les sols salées
- 18) www.centre-cired.fr/forum/IMG/doc/Le_sel_de_la_terre-2.doc -
- 19) www.ensaia.inpl-nancy.fr/Intranet/coursext/Salinisation_des_sols.pdf
- 20) www.iav.ac.ma/agro/dss/chimiesol/chap4.htm - 130k -
- 21) www.pcsi.ird.fr/sempsi2/communications/Poussin.pdf