

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Jijel
Faculté des Sciences
Département d'Ecologie Végétale et d'Environnement

جامعة جيجل
كلية العلوم
قسم علم البيئة النباتية والمحيط

جامعة مستخدم الصناديق بن بختيس
كلية علوم الطبيعة والحياة
المكتبة
1495
تم الجرد



BV. 23/08

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme d'études supérieures (DES) en Biologie.

Option : Biologie et physiologie végétale

Thème

**EFFET DE LA SALINITÉ SUR
LA NUTRITION MINÉRALE DES VÉGÉTAUX**

Jury :

Président: Mr Kisserli. O
Examineur: Mr Roula. S
Encadreur : M^{lle} Benterrouche. I

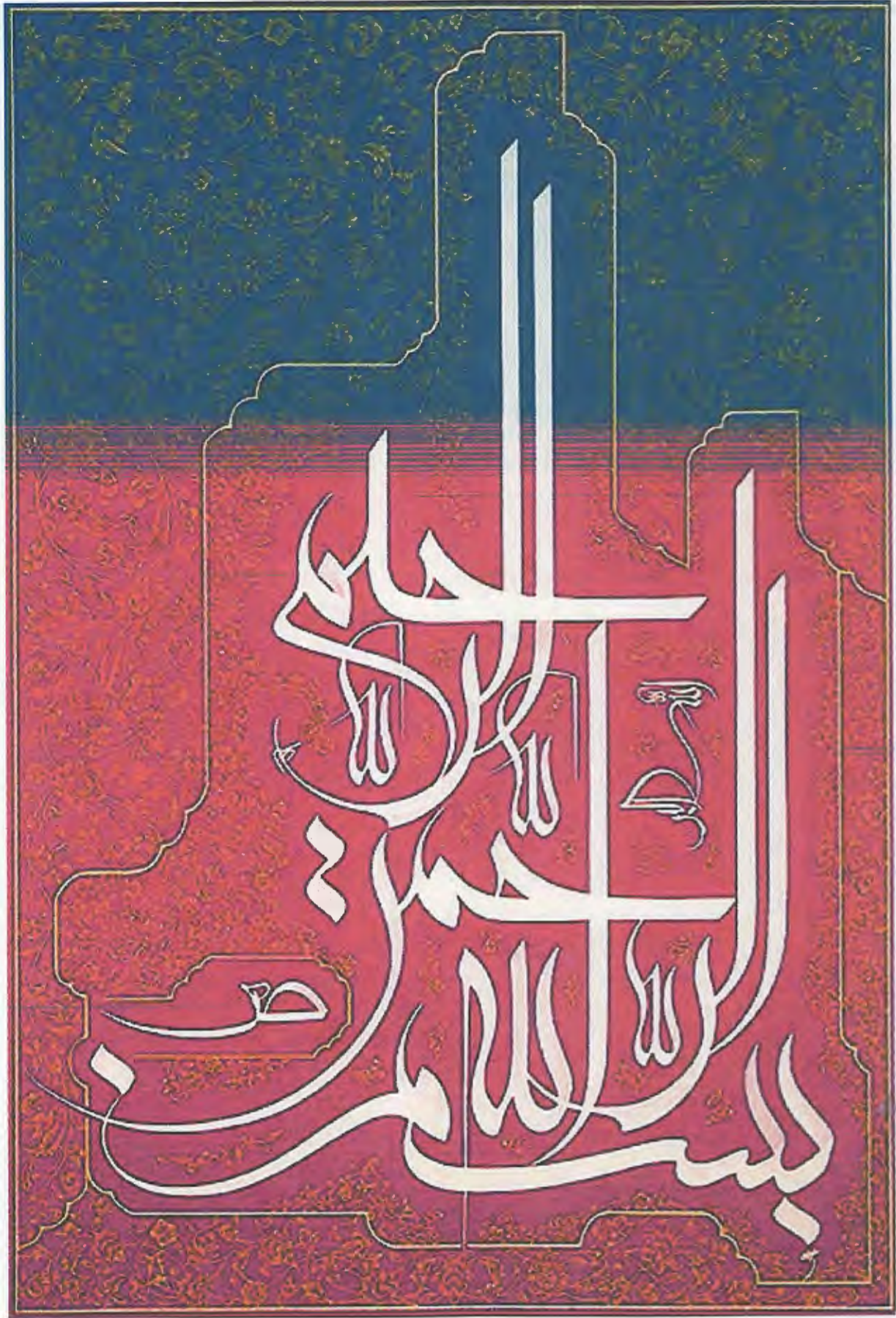
Présenté par :

M^{lle}: Kemiha Souhila
M^{lle}: Bounit Dalila



Numéro d'ordre :

Promotion septembre 2008



Remerciements

*Avant tout, Au terme de ce travail, nous remercions le **BON DIEU** tout puissant qui nous a donné la force et la volonté d'achever cette réalisation et nous lui rendons grâce.*

*Il nous est très agréable de pouvoir présenter ici notre plus profond remerciement à notre promoteur: **Mlle Benterrouche I**, pour son soutien moral, pour sa gentillesse, sa patience, sa serviabilité, et ses conseils judicieux. Elle ne nous a pas ménagé l'aide et le temps qu'elle nous a bien voulu nous consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour, nous lui en sommes profondément reconnaissantes.*

Nous adressons également nos sincères remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté d'évaluer et corriger ce modeste travail ;

*à **Mr: KISSERLI O**, qui trouvera ici l'expression de notre gratitude,*

*à **Mr: ROULA. S** ; à qui nous présentons nos respects et le profond remerciement pour le soutien, l'encouragement, et l'aide qui a prouvé envers ses étudiants.*

*Nous adressons aussi nos sincères remerciements à tous les enseignants qui nous ont passé leur savoir durant tout le cycle, particulièrement à **Mlle Lamzari, Mr ALiane, Mr Yakhalf,***

***Mr Handis, Melle Ghorab I** et tous qui nous ont passer la science avec plaisir.*

*Nous adressons aussi nos remerciements à l'équipe chargée du labo de biologie pour leur disponibilité particulièrement à **Houria**.*

Nous tenons à remercier toute personne ayant participé de près ou de loin à l'élaboration de ce présent mémoire et toutes les mains qui nous ont été tendues, particulièrement nos parents.



Kemiha S et Bouunit D.

Liste des figures

Figure	page
Figure 01: Relation entre les bicarbonates des nappes et ceux des horizons inférieurs	08
Figure 02: Relation entre les sulfates des nappes et ceux des horizons inférieurs.....	08
Figure 03: Relation entre les chlorures des nappes et ceux des horizons inférieurs	08
Figure 04: Salinisation de sols dans les zones.....	10
Figure 05: Quatre principaux modes de salinisation des sols	10
Figure 06 : Salinisation en bas de pente.....	11
Figure 07: Aspect de la surface des sols salinisés.....	16
Figure 08: Les différents signes de la salinisation des sols.....	17
Figure 09: Effets de la fertilisation potassique et du temps d'application du potassium sur le rendement en poids frais de tubercules	23
Figure 10: Symptôme typique de carence: nervures vertes et limbe jaune.....	29
Figure 11: Les jeunes pousses sont les premières atteintes par un manque de fer	29
Figure 12: Changement de la concentration ionique de la solution nutritive et de la sève des racines du maïs et du haricot.....	38
Figure 13: Production de biomasse de différents groupes de plantes suivant la salinité...	43
Figure 14: Un modèle d'illustration de la détection et réponse par la racine des plantes, une fois développé dans différentes conditions salines.....	55
Figure 15: Micrographe électronique (550X) des glandes de sel sur la surface de zoysiagrass. Les glandes sont des les rangées, parallèle aux stomates	59
Figure 16: Cristaux de sel sur une feuille de zoysiagrass	59
Figure 17: Précipitation et incrustation des sels en dehors de l'eau de pores chez <i>Ficus formosana</i>	60
Figure 18: Le trichome géant et trichomes glandulaires chez <i>Ficus formosana</i>	60
Figure 19: Isolement de Na dans les feuilles	62
Figure 20: <i>Euphorbie</i>	64
Figure 21: <i>Cucurbita foetidissima</i> (racine xérophytique succulente): Racine découpée pour montre les tissus succulents.	64
Figure 22: les trois aspects de la tolérance au sel dans les végétaux.	64

Figure 23: Fonction de la voie SOS en homéostasie ionique sous stress salin.....	66
Figure 24: Stratégies de l'amélioration de la tolérance des cellules à la salinité.....	67
Figure 25: Fonction des antiports de sodium.....	68
Figure 26: Les voies d'osmorégulation.....	70
Figure 27: La Glycine bétaine et 3-Diméthylsulfoniopropionate (DMSP).....	70
Figure 28: Contrôle de la transpiration chez les végétaux.....	72
Figure 29: Les principaux processus qui contribuent à l'établissement des rapports cytoplasmiques de K^+ / Na^+ dans les plantes.....	73
Figure 30 : effet de l'application de gypse sur l'infiltration cumulative dans un sol salin a - avec, b - sans gypse.....	76
Figure 31: Irrigation gravitaire avec l'eau traitée.....	77
Figure 32: Effet du traitement de l'eau d'irrigation sur le développement végétatif du maïs: irrigué avec l'eau traitée ou non traitée.....	77
Figure 33: Le kayendo: Curieuse pelle.....	78
Figure 34: Blocage des remontées capillaires.....	79
Figure 35 : effet du gypse et de la lixiviation sur le déplacement de sel et le SAR.....	80
Figure 36: Biodrainage et bioélimination.....	82
Figure 37: bioélimination des eaux d'infiltration par l'Eucalyptus.....	82
Figure 38: Récupération des eaux de drainage.....	86
Figure 39: Bonification des sols salés et sodiques des bordures de Chott Jérid : parcelle cultivée et irriguée en plein sols salés et sodiques (Tozeur, Tunisie).....	89

Liste des abréviations

ABA	Acide abscissique
ATP	Adénosine tri phosphate
B	Bore
C	Carbone
C°	Degré Celsius
Ca ²⁺	Calcium
CaCO ₃	Carbonate de calcium
CaSO ₄	Sulfate de Calcium
CAT	Concentration des cations totaux
CCA	Concentration des cations
CE	Conductivité électrique
Cl	Chlore
Cl-	Chlorures
cm	Centimètre
cm/j	Centimètre par jour.
Co	Le cobalt
CO ₂	Dioxyde de carbone
Cs	Concentration critique en sel
cs	Césium
Cu	Cuivre
DMSP	Diméthyl sulfonio propionate
Ds / m	Decisiemens par mètre
Fe	Fer
G	Gramme
g/l	Gramme par litre
GTP	Guanine tri phosphate
h	Heure
HCO ₃ ⁻	Bicarbonates
HPO ₄ ²⁻	Ion phosphate

H-S	Thiosulfate
HSP	Heat-Shock Proteins
K+	Potassium
KCl	Chlorides de potassium
kg d'urée /l	Kilogramme d'urée par litre
kg N/ha	Kilogramme d'azote par hectar
kg/ha	Kilogramme par Hectar
L	Litre
LEA	Late Embryogenesis Abundant
Li+	Lithium
m mole	Milli mole
MAPK	Mitogen-Activated Protein Kinase
méq	Milli équivalent
mg	Milligramme
Mg	Magnésium
mg / l	Milligramme par litre
MgCl ₂	Chloride de magnésium
min	Minute
ml	Millilitre
Mn	Manganèse
Mo	Le molybdène
mol / l	Equivalent par litre
MPa	Méga Pascal
MS	Matière sèche
N	Azote
n mole	Nano mole
Na+	Sodium
Na Cl	Chloride de Sodium
NH ₂	groupement amine
NH ₄ ⁺	Ion Ammonium
NO ₃ ⁻	Nitrates
P	Le phosphore
pH	Potentiel hydrogène
PO ₄ ³⁻	Phosphate

ppm	Par poids moléculaire
RNA	Acides ribonucléiques
S	Soufre
SD	Sans date.
SG	Salt gland (glande à sel)
SO ₄ ²⁻	Ion sulfate
SOS	Salt Overly sensitive
SP	Espèce
UI	unité internationale
UTP	Uridine tri phosphate
V	volume
Zn	Le Zinc
Ψ	Potentiel
%	Pour cent
μg	Micron gramme
μl	Micron litre



Sommaire

Sommaire

Introduction :	01
Chapitre 01: <u>La salinité</u>	
1.1. Définitions	03
1.1.1. La salinité	03
1.1.2. La salinisation	03
1.2. Origine des sels dans les eaux et les sols	04
1.2.1. Accumulation des sels dans l'eau	04
- Eau de pluie	04
- Eau de surface	04
- Les eaux souterraines	05
1.2.2. Accumulation des sels dans le sol	06
-L'océan et la mer	06
-La lithosphère	06
-Eaux de nappe et eaux souterraines : capillarité, et évaporation d'eau	06
-Les eaux de surface et marginales.....	08
-Les apports anthropiques	09
1.3. Caractérisation de la salinité des eaux et des sols.....	11
1.3.1. Caractérisation de la salinité des eaux d'arrosage ou d'irrigation.....	11
a) Les résidus secs.....	11
b) Contenu des sels dissous	11
c) La conductivité électrique	12
d) l'indice RAS ou SAR.....	14
1.3.2. Caractérisation de la salinité des sols	15
1.3.3. La caractérisation de la salinité par observation des symptômes ou des signes précurseurs.....	16

1.4. Effets de la salinité.....	17
1.4.1. Effets de la salinité sur les sols	17
1.4.2. Effets de la salinité sur les végétaux.....	18

Chapitre 02 : Effets de la salinité sur la nutrition minérale

2.1. La nutrition minérale.....	19
2.1.1. Introduction	19
2.1.2. Facteurs ambiants de la nutrition.....	20
2.1.3. Les éléments nutritifs	20
2.1.3.1. Introduction	19
2.1.3.2. Les éléments nutritifs essentiels	20
a) Les macroéléments	20
b) Les micro-éléments ou oligo-éléments	20
2.1.4. Le rôle des éléments minéraux.....	21
2.1.4.1. Les éléments majeurs	21
-L'azote	21
-Le magnésium	21
-Le calcium	21
-Le phosphore.....	22
-Le soufre	22
-Le potassium	22
2.1.4.2. Les éléments mineurs	24
-Le sodium	24
-Le fer.....	24
-Le chlore.....	24
-Le molybdène	25
-Le bore.....	25
-Le Manganèse	25
-Le Zinc.....	25
-Le cuivre.....	25
-Le cobalt	25
2.1.4.3. Les carences	25
- L'Azote	26
-Le potassium	26
- L'Azote	27

-Le potassium	27
-Le chlore	28
-Le bore.....	28
-Le Zinc.....	28
-Le Molybdène.....	28
- Le Fer	28
-Le cuivre.....	29
-Le Manganèse	29
2.1.5. La disponibilité des éléments minéraux	34
2.1.6. Mouvement des éléments nutritifs vers la surface des racines.....	34
2.1.6.1. Introduction	34
2.1.6.2. Interception racinaire	34
2.1.6.3. 2.1.6.3. Mass flow.....	35
2.1.6.4. 2.1.6.4. Diffusion	35
2.1.7. L'absorption des éléments	36
-Sélectivité.....	38
-Accumulation	38
-Génotype.....	38
2.1.8. Interactions entre les ions	29
2.1.8.1. Compétition.....	39
a)- La consommation de luxe du potassium, et antagonismes potassium- magnésium, potassium- calcium, potassium- sodium et potassium- bore	40
b) antagonisme phosphore- cuivre et phosphore	41
c) potassium Antagonisme azote- cuivre	41
d) l'excès de calcium	41
2.1.8.2. Synergie entre les ions	41
2.1.9. Relation anion – cation	42
2.2. Effet de la salinité sur la nutrition des plantes	42
2.2.1. Introduction	42

L'effet combiné synergique et antagoniste.....	44
2.2.2. Effet sur l'absorption	45
2.2.2.1. L'absorption et l'accumulation du Cl ⁻ et du Na.....	46
2.2.2.2. Effet sur l'absorption et l'accumulation du Ca ²⁺ et du K ⁺	48
2.2.2.3 Effet sur l'absorption et l'alimentation en azote	50
2.2.2.4 Effet sur l'absorption et la nutrition en phosphore.....	51
2.2.2.5 Effet du type de sels.....	52
2. 2. 2. 6. La salinité améliore le rendement et la qualité du fruit.....	53

Chapitre 03 : Stratégies d'adaptation des végétaux au milieu salin

3.1. Stratégies de réponses au stress	54
3.2. Principe général d'adaptation.....	54
3.2.1. L'adaptation élastique	54
3.2.2. L'adaptation plastique	54
3.3. La résistance par exclusion et la résistance par tolérance/inclusion	54
3.3.1. La résistance par exclusion	54
3.3.2. La résistance par tolérance/inclusion	54
3.4. Mécanismes de réponse au stress	55
3.4.1. Mécanismes d'évitement	56
3.4.2. Mécanismes de tolérance	56
3.5. Aspects et stratégies d'adaptation au stress salin.....	57
3.5.1. Aspect d'adaptation morpho- anatomique	57
3-5-1-1 Détoxification par l'accumulation de sel dans les parties aériennes spécifiques puis Excrétion sur la surface foliaire	57
3.5.1.2. Détoxification par rejet des tissus et des organes -saturés en sel	62
3.5.1.3. Détoxification par l'élimination des sels par les racines.....	62
3.5.1.4. Le contrôle par la réduction de la croissance	63
3.5.1.5. Adaptation tissulaire par la succulence	63
3.5.2. Aspect physiologique, biochimique et génétique	64
3.5.2.1. La tolérance sur le plan physio- biochimique	64

-Compartimentation intracellulaire et synthèse des « Osmoprotectants ».....	65
-Régulation de l'homéostasie ionique.....	65
-Le contrôle génétique de l'homéostasie ionique.....	66
- L'exclusion et la compartimentation de Na ⁺ : échange vacuolaire	67
-L'osmorégulation et le maintien de l'homéostasie osmotique.....	68
3.5.2.2. Contrôle et réparation des dégâts provoqués par le stress salin qui induisent des protéines.....	71
3.5.2.3. Gestion du stress oxydatif	71
3.5.2.4. La stratégie d'adaptation physiologique de l'excrétion foliaire.....	71
3-5-3-Contrôle de la transpiration	72
3.5.4. Adaptation des plantes par les voies photosynthétiques.....	72
3.5.5. Le trajet général du sel dans la plante selon l'inclusion et l'exclusion.....	73
L'inclusion	73
L'exclusion	74
3.5.6. Découverte génétique	74

Chapitre 04 : Amélioration des sols salins

4.1 Introduction	75
4.2. Les solutions par méthodes chimiques	75
4.2.1. Amendement	75
a) Pour les sols dont la structure n'est pas encore complètement modifiée par la salinité et la présence de Na ⁺	75
b) Pour les Solonetz	76
4.3. Méthodes physiques et mécaniques	77
-Éraflure.....	78
-Rinçage	78
-Raclage	78
-Nivellement.....	78
-Travail de sol léger.....	78
-Lixiviation.....	79
-Labour profond.....	79
-Abaissement de la nappe par surélévation des terres	80
4.4. Méthodes biologique.....	80

-Application de matière organique	81
-Paillage	81
-Bio drainage et bio- élimination des eaux d'infiltration	81
-Agriculture saline et - désalinisation des eaux (Osmose inverse)	82
-Phytoremédiation des sols salins, calcaires et sols sodiques	82
-L'utilisation de variétés tolérantes à la salinité.....	83
-Les cultures fourragères et les plantes vivaces pour gérer les apports d'eau .	83
-La méthode pépinière repiquage.....	83
-Riziculture irriguée.....	83
4.5. La gestion hydraulique	84
4.5.1. Le drainage	84
4.5.1.1. Pratiques du drainage	84
a- Le lessivage des sels en excès par le drainage	84
b- L'abaissement du niveau de la nappe par le drainage.....	85
c- Drainer et apporter du gypse (Drainage et plâtre).....	85
4.5.1.2. Les avantages du drainage profond	85
4.5.1.3. Situations pour lesquelles le drainage n'est pas envisageable.....	86
4.5.1.4. Récupération des eaux de drainage	86
4.5.1.5. Choix du type de drainage.....	86
4.5.2. Gestion des eaux d'irrigation	88
4.5.2.1. Intensité de l'irrigation	88
4.5.2.2. Modification de méthodes d'irrigation.....	88
<i>Conclusion</i>	90

Liste bibliographique.



Introduction

Introduction :

La salinité des sols est l'un des plus grands problèmes pour la production agricole dans de nombreuses régions du monde (Zhu, 2000; Munns, 2001, 2002; Turan et Sezen, sd). Presque 1/3 des terres irriguées souffre de ce problème (Turan et Sezen, sd).

En Algérie: une superficie de 300 000 ha (sur 1400000 ha étudié) sont concernés par la salinisation ou l'alcalinisation. Dans les seules provinces de Saïda et de Biskra, il est estimé que 22.000 ha de terres irriguées et 5 millions d'hectares de terrains de parcours sont touchés par la salinisation qui y conjugue ses effets avec ceux de l'ensablement. En fait, ce phénomène est général sur toutes les zones arides ou sub- désertiques (Torne et al., 2007).

La salinisation des sols des régions souvent fertiles n'est pas seulement liée aux conditions climatiques, mais également à l'activité de l'homme qui, pour des raisons économiques, a développé une agriculture intensive souvent mal contrôlée. Le fort ensoleillement et la faible pluviométrie ont obligé les agriculteurs à irriguer en quantité importante et souvent, avec une eau saumâtre. Les sels se sont accumulés au cours des ans à la surface des sols rendant ainsi les terres impropres à la culture. En effet, l'alimentation en eau et en éléments nutritifs essentiels des plantes est rendue difficile; certains éléments peuvent avoir en outre un effet toxique spécifique (Levigneron et al., 1995).

Ainsi, la gestion des terres salinisées exige une combinaison de pratiques agronomiques spécifiques dépendant d'une définition précise des conditions basées sur une étude préalable détaillée et complète des caractéristiques du sol, de la qualité de l'eau et des conditions locales, incluant le climat, les cultures, ...etc (Mashali et al., 2005).

L'objectif de ce travail est de constituer une revue bibliographique sur la problématique de la salinisation ; d'évaluer les effets du NaCl sur les végétaux et de fournir des informations sur l'importance de la nutrition minérale convenable, avec des concentrations bénéfiques et de déterminer les effets de la salinité sur la croissance et le rendement.

Dans ce contexte :

Un premier chapitre est destiné à une présentation des données générales sur la salinité et la salinisation, son origine et le processus d'apparition de la salinisation primaire ou secondaire et les méthodes de mesure et d'évaluation.

Dans le second chapitre, la nutrition minérale sera étudiée brièvement, en exposant ainsi le phénomène d'absorption, et de la prise des sels minéraux et leur transport dans la plante, ainsi que le rôle des nutriments, les relations ioniques, les conséquences de leur excès et leur carence pour la plante, cela pour arriver à déterminer l'effet de l'excès des sels (salinité), sur la nutrition, et l'élément le plus néfaste, parlant ainsi les antagonismes qui s'effectuent entre les éléments nutritifs et les ions sodium et chlore. On concluant une certaine différence par-rapport à la réponse des plantes (sensibles, résistantes, tolérantes).

Un troisième chapitre, est consacré aux mécanismes et aux méthodes que la plante l'utilise pour survivre sur des milieux salins, distinguant ainsi les glycophytes des halophytes.

Dans un dernier chapitre, nous allons citer les différentes méthodes pour contrôler, remédier aux problèmes de la salinité et aménager les sols dans le but de l'amélioration du rendement agricole.

1.1. Définitions

1.1.1. La salinité :

La salinité est la concentration de sels minéraux dissous dans les eaux et les sols sur une unité de volume ou de poids (Majerus, 1996). La salinité varie avec la teneur en eau et la température (Skiredj, 2007).

La salinité est exprimé dans un certain nombre de différentes manières mol/l (équivalent par litre), en mg / l (ppm), la conductivité électrique CE (dS / m ou mmhos / cm) et le total des solides dissous (TDS, %) (Majerus, 1996).

Les éléments chimiques qui sont importants à considérer dans l'étude de la salinité sont:

- Cations: Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Li^+ .
- Anions: Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , NO_3^- .
- Autres éléments chimiques : Si, B, Se.

1.1.2. La salinisation:

C'est un processus d'enrichissement d'un sol en sels solubles (chlorures, carbonates, sulfates - de sodium, magnésium et calcium) qui aboutit à la formation d'un sol salin (Anonyme, 2006; König, 2007). Cette accumulation de sels à la surface du sol et dans la zone racinaire, occasionne des effets nocifs sur les végétaux et le sol; il s'en suit une diminution des rendements et, à terme une stérilisation (Mermoud, 2006). Il s'agit de sels neutres concentrés dans le profil de sol, en quantité suffisante pour affecter ses aptitudes agronomiques (augmentation de la pression osmotique provoquant un stress hydrique de la plante) (Lacharme, 2001).

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.).

Les études apportent que 80 % des terres salinisées sont d'origine naturelle. On parle alors de salinisation "primaire", due aux sels se formant lors de l'altération des roches ou à des apports naturels externes, et 20% des terres salinisées, soit près de 15 Mha sur le continent Africain, ont une origine "anthropique". On parle alors de salinisation "secondaire", induite

par l'activité humaine, liée aux pratiques agricoles et en particulier à l'irrigation (Anonyme, 2006).

1.2. Origine des sels dans les eaux et les sols :

L'origine ultime des sels est la décomposition des roches ignées et l'activité des volcans. Les ions sont ensuite libérés par des processus tels que l'hydratation, l'hydrolyse, l'oxydation et des réductions et échanges.

1.2.1. Accumulation des sels dans l'eau

Une partie de la salinité des eaux, peut être d'origine géologique (Khadraoui, 2004). Les processus géologiques ont contribué à la dissolution lente de la croûte terrestre et ont mené au dépôt des quantités significatives de sodium, de calcium, de magnésium, de chlore, de sulfate, de carbonate, et de nombreux d'autres composés inorganiques dans les océans (Postel, 1989 in Shannon, 1997).

Aussi, la salinité peut être d'origine océanique et marine. Les océans peuvent affecter les eaux des nappes de certains secteurs sensibles à l'invasion marine directe ou à la remontée d'une salure « sédimentaire » imprégnant les formations sous-jacentes. Cette contamination de la nappe par les eaux de l'Océan est facilitée par la bonne perméabilité des formations aquifères. L'apport marin et celui des sédiments (sous-jacents) sont le résultat du déficit pluviométrique comme le cas de la région d'Agadir au Maroc, qui peut connaître une différence de l'origine d'un secteur à l'autre en remarquant à titre d'exemple une minéralisation élevée au niveau du secteur le plus sulfatée et plus pauvre en bromures peut être distinguée des précédentes, il s'agit d'une eau d'origine atlasique ayant lessivé les évaporites du Crétacé et du Lias. Et une minéralisation élevée dans le secteur d'Aït Melloul, qu'on peut lui attribuer une origine mixte à la fois marine et atlasique (Hsissou et al., 2001).

Selon Stengel et Gelin (1998), toutes les eaux naturelles contiennent des minéraux dissous et des matières gazeuses. L'accumulation de sels dans une eau dépend de son origine :

- **Eau de pluie** : gaz atmosphérique dissous et sels cycliques.

- **Eau de surface** : sa composition et sa concentration varient dans l'espace et dans le temps.

Cette variation dépend de :

- La géologie du bassin versant.
- Le Climat : la neige contient moins de sels que la pluie.

- L'Évaporation : la concentration de la solution augmente avec l'augmentation de l'évaporation. Ceci entraîne une variation de la salinité d'un cours d'eau avec la saison.

La solubilité des sels augmente avec la température, à l'exception du CaCO_3 dont la solubilité diminue de 2,3 % pour une augmentation de la température de 1°C (Moughli, sd).

Tel est le cas de la salinité des eaux des nappes phréatique à Ouargla, la variation de la concentration des éléments chimiques dans l'espace, est liée à la répartition des formations géologiques et la morphologie de la vallée de Ouargla. Par contre les variations dans le temps sont dues à l'effet de la température (évaporation). L'étude des rapports de la salinité révèle un phénomène d'échanges de bases (cations) entre l'eau de la nappe et les formations argileuses ; un phénomène qui affecte 50 % des échantillons, elle est influencée tant par les évaporites que par les carbonates et tant par les chlorures que par les sulfates (Nezli et al., 2004).

- Les eaux souterraines :

En général, leur composition est assez variable d'une place à une autre mais elle n'est pas très variable d'une année (ou saison) à l'autre s'il n'y a pas d'effet notable de l'homme. La composition et la concentration en sels dépendent de la formation géologique qu'elle traverse, de sa température et de la composition de l'eau de recharge, s'il y en a. (Marjoua et De Marsily, 1995). A titre d'exemple, environ 10% des précipitations annuelles en Arabie Saoudite (Subiani, 2004 in Rauahna, 2007).

L'essentiel de cette salinité naturelle et climatique a pour origine le lessivage des sels abandonnés dans le sol lors de la transpiration des plantes. (Marjoua et De Marsily, 1995).

L'évaporation intensive de la surface des eaux d'irrigation qui conduit à la précipitation des sels. Exemple: la calcite, la dolomite et le gypse particulièrement affectent les eaux souterraines à certaines profondeurs.

- Le taux de recharge est un autre facteur contribuant à l'augmentation de la salinité
- Le problème de la salinité peut être dû aux matériaux fins dans la formation de l'aquifère (Subiani, 2004 in Rauahna, 2007).

La salinisation de la ressource en eau est aggravée dans certains cas par une pollution d'origine anthropique, le plus souvent domestique, qu'industrielle ou agricole (salinisation

secondaire), ce qui rend l'eau le plus souvent impropre dès fois à l'irrigation (Khadraoui, 2004).

1.2.2. Accumulation des sels dans le sol :

Les horizons Supérieurs du sol sont salés avant toute intervention humaine. Cette salinité peut avoir diverses causes, marines ou continentales (De Forges, 1972). Elle apparaît liée quelque fois aussi au volcanisme, et aux roches marines (exemple trias), à partir de ces sources, les sels de type chlorures (Na, K, Ca, Mg) ou sulfates (Na, Ca, Mg), qui sont respectivement très ou moyennement solubles, vont pouvoir se déplacer et aller contaminer à la fois les nappes et les sols (Robert, 1996).

- L'océan et la mer:

Les accumulations des sels dans le sol se fait par l'intermédiaire de l'atmosphère, qui peut véhiculer ces sels dissous dans l'eau de pluie, mais surtout de très fines particules hygroscopiques sous forme d'aérosols (Stengel et Gelin, 1998 ; Alvet, 2003 cité par Rouahna, 2007). Ces accumulations se produisent également intensivement dans des climats secondaire -humides et humides, en particulier dans les régions côtières où l'entrée de l'eau de mer par des estuaires et des fleuves et par des eaux souterraines (Abrol, 1988), et les intrusions d'eau salée ou des submersions des terres basses (Mermoud, 2006a).

- La lithosphère:

La salinisation primaire se produit naturellement là où la roche mère du sol est riche en sels solubles (Mermoud, 2006a). Leur principale source dans le sol est les minerais primaires dans la couche exposée de la croûte terrestre. Pendant le processus de la désagrégation chimique qui comporte l'hydrolyse, l'hydratation, la solution, l'oxydation, la carbonatation et d'autres processus, les constituants de sel sont graduellement libérés et solubles (Abrol, 1988).

Du fait de l'altération des roches constituant les îles océaniques ou la croûte continentale. Il s'agit surtout dans le premier cas de basaltes, dans le deuxième cas de granites ou de roches voisines, et les sels dissous résultent de réactions d'hydrolyse des aluminosilicates et des ferromagnésiens (Stengel et Gelin, 1998).

D'après Robert (1996), une destruction naturelle de la végétation, peut aussi contribuer à la salinité des sols, (feu, surpâturage, production de charbon de bois, culture itinérante...).

- Eaux de nappe et eaux souterraines : capillarité, et évaporation d'eau :

Après une altération des roches, les sels libérés sont transportés à partir de leur source d'origine par des jets de surface ou d'eaux souterraines. Les sels dans le jet d'eaux

souterraines sont graduellement concentrés pendant que l'eau avec des sels dissous se déplace du plus humide aux secteurs moins humides et relativement arides (Abrol, 1988). Par conséquence, les nappes profondes sont souvent trop riches en sels minéraux, leurs eaux sont très vite contaminées, elles se relèvent très lentement en cas de déplétion accentuée et beaucoup d'entre elles, situées dans les zones arides, se sont constituées lors des phases pluviales et ne se renouvellent pas entraînant des phénomènes consécutifs de salinisation des sols (Erlers et al., 2006; König, 2007).

Dans plusieurs régions, surtout celles situées au Sahara Septentrional, sont confrontées aujourd'hui à des problèmes de remontée des eaux provenant des nappes phréatiques, causes de l'accroissement de l'excès de salinité dans les sols agricoles (Ben Aïssa, 2004; Khadraoui, 2004). En Algérie, dans des régions sahariennes comme (Ouargla, El Oued, Biskra) les eaux sont de mauvaise qualité et leur teneur en sels peut dépasser les 7 g/l de résidu sec (région de Oued Rhir).

Le faible taux de renouvellement des eaux de la nappe et leur recyclage par l'irrigation favorise l'augmentation de leur charge saline (Marjoua et De Marsily, 1995). C'est comme le cas des zones arides, et semi arides lorsque le sous-sol n'est pas assez perméable, une nappe d'eau souterraine va se constituer et son niveau s'élèvera avec le temps, un jour viendra où une communication capillaire s'établira entre cette nappe salée et les horizons cultivés. Ainsi une migration d'humidité vers le haut va entraîner vers les couches supérieures les sels contenus dans la solution; l'eau s'évaporerait, et la couche arable deviendrait de plus en plus salée (De Forges, 1972; Anonyme, 2005).

Une forte teneur en sels conjuguée à la présence d'une nappe phréatique proche de la surface du sol, est l'une des principales causes de la stérilisation des sols de plusieurs zones agricoles (Khadraoui, 2004).

Rouahna (2007) a mis en évidence cette remontée des nappes phréatiques, selon ses résultats, il existe une relation entre les eaux des nappes et la salinité des sols, comme les sols gypseux, surtout qu'ils présentent les mêmes sels avec une différence des quantités. A Ain Ben Noui au sud d'Algérie, l'une des causes de la salinité des sols est la présence de la nappe phréatique salée qui est riche en sulfates et en calcium (fig.: 1, 2 et 3), et à côté de la présence de la nappe, il y a des apports extérieurs participant dans la salinité des sols; les eaux d'irrigation, les dépôts éoliens à base de matière salée.

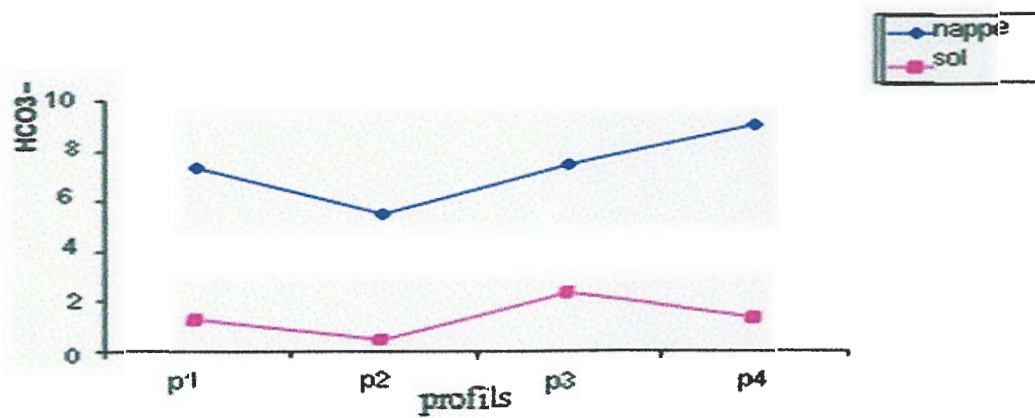


Figure1: Relation entre les bicarbonates des nappes et ceux des horizons inférieurs.

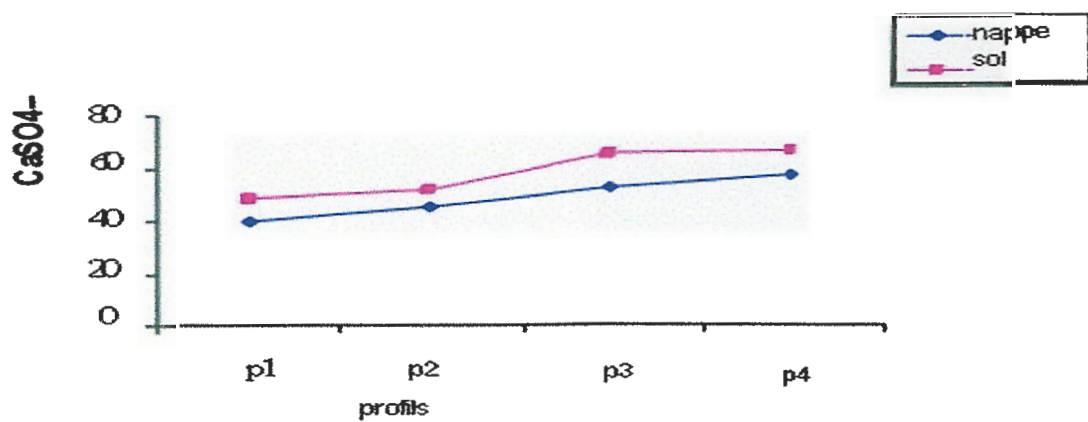


Figure 2: Relation entre les sulfates des nappes et ceux des horizons inférieurs.

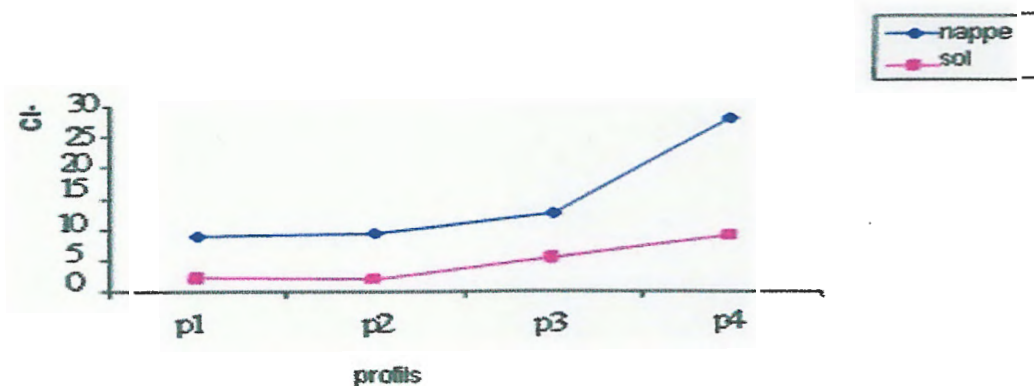


Figure 3: Relation entre les chlorures des nappes et ceux des horizons inférieurs.

Les eaux de surface et marginales : peuvent contaminer les sols en recevant des apports marines, soit par la surface (embruns,...) soit par le sous sol, suite à des pompages excessifs dans les nappes phréatiques, ou par un apport de vent (Robert, 1996), telles que les eaux des nappes phréatiques superficielles considérées comme marginales qui sont fragiles alimentées

par les pluies saisonnières et souvent en équilibre instable avec un front marin. Leur utilisation rationnelle et prudente par les petits moyens des paysans, avait permis le maintien de cet équilibre. Il se trouve que beaucoup d'entre elles sont aujourd'hui salinisées par contamination marine, et des périmètres sont en conséquence abandonnés (Sahel sfaxien de Tunisie, Niayes du Sénégal ...) (Loyer, 1991).

-Les apports anthropiques:

La salinisation secondaire est induite par l'activité humaine ; liée fréquemment à des pratiques agricoles inappropriées. Les sels proviennent des engrais inorganiques, amendements du sol (par exemple, de gypse, de compost et fumier), et les eaux d'irrigation (Kotuby-amacher et *al.*, 1997; Mermoud, 2006a). L'homme intervient par des apports directs tels que les apports de sels utilisés comme fertilisants (KCl, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$..) soit indirects via les rejets atmosphériques, par des modifications globales ou régionales des apports atmosphériques du climat et des régions hydrologiques, au travers notamment des aménagements hydrauliques et des défrichements (Stengel et Gelin, 1998).

L'importance de l'accumulation des sels dans le sol dépendra de la qualité d'eau d'irrigation, de la conduite des irrigations et de l'efficacité du drainage. A une concentration excessive du sel correspond une baisse de rendement, du fait que cette salinité des eaux d'irrigation a une influence directe sur l'évolution des sols (Khadraoui, 2004; Ben Aïssa, 2004).

En zone aride ou semi-aride, la concentration en sel des eaux utilisées est souvent non négligeable du fait d'une faible pluviométrie, conjuguée à une forte évaporation, et les pluies ne provoquent pas un lessivage suffisant (De Forges, 1972), et dans d'autre situation, lorsque ces régions sont mal drainées la teneur en sels dans les eaux usées augmente la salinisation des sols. Les conditions locales du sol, telles que les fortes teneurs en matière organique et les valeurs de pH élevées, semblent prévenir la solubilité des métaux lourds (Gutiérrez-Ruizi et *al.*, 1995). Une autre source importante de sels dans de nombreux sols paysage provient de déglaçant (déneigeant) sur les routes et les trottoirs. Pratiquement l'ajout de n'importe quel matériel soluble va augmenter la salinité des sols (Kotuby-Amacher et *al.*, 1997).

D'une façon générale, les principaux modes et mécanismes de la salinisation des sols, qu'elle soit naturelle ou anthropique sont illustrés dans les figures (4, 5 et 6):



Figure04: Salinisation de sols dans les zones arides (Anonyme, 2003).

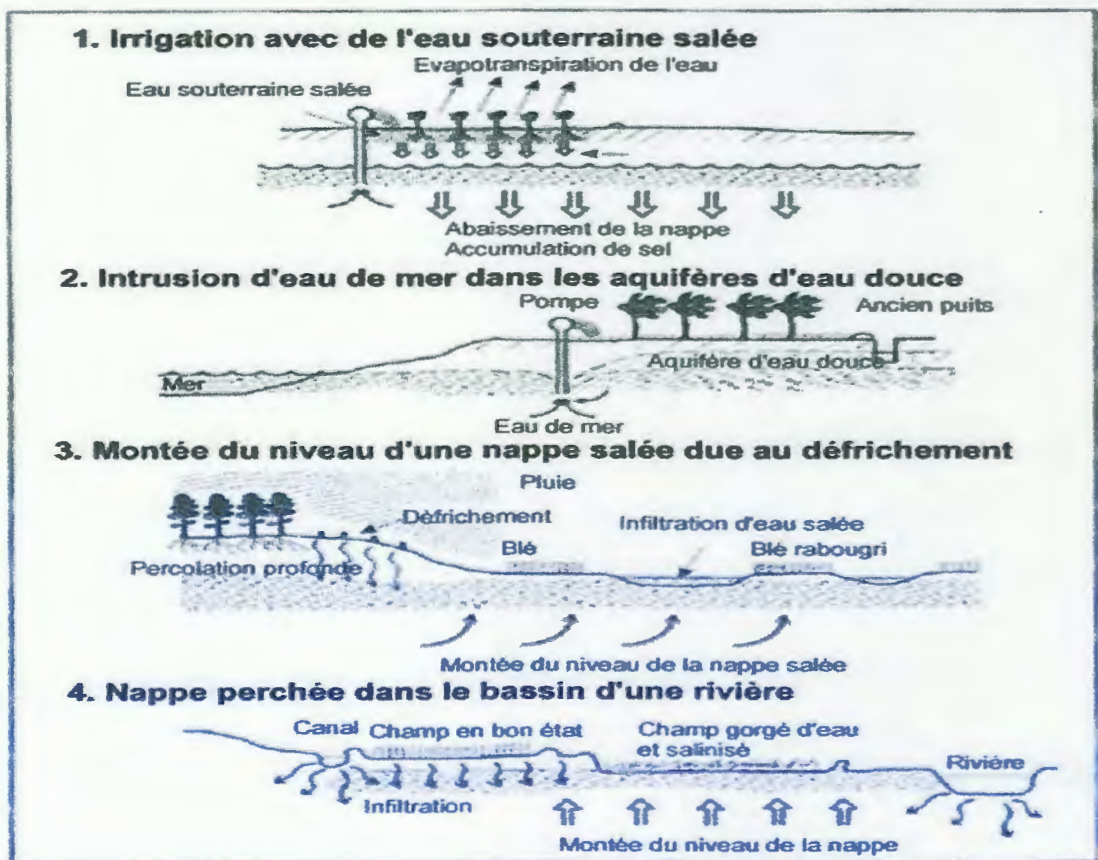


Figure 05: Quatre principaux modes de salinisation des sols (Antipolis, 2003).

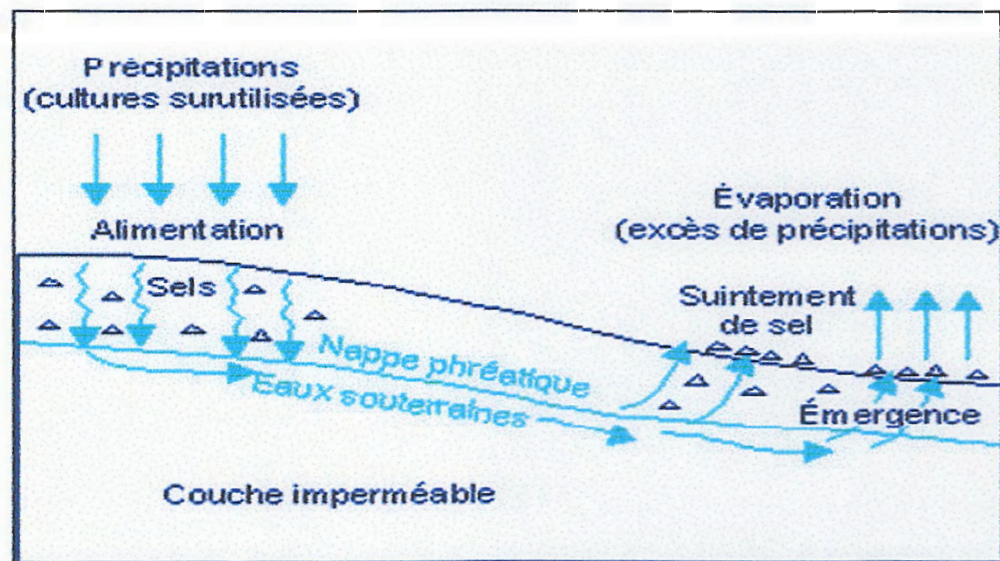


Figure 06 : Salinisation en bas de pente (Koïng, 2007).

1.3. Caractérisation de la salinité des eaux et des sols:

1.3.1. Caractérisation de la salinité des eaux d'arrosage ou d'irrigation:

Les principaux sels responsables de la salinité de l'eau sont les sels de calcium (Ca^{2+}), de magnésium (Mg^{2+}), de sodium (Na^+), les chlorures (Cl^-), les sulfates (SO_4^{2-}) et les bicarbonates (HCO_3^-). Une valeur élevée de la salinité signifie une grande quantité d'ions en solution (Couture, 2004). L'excès des sels minéraux peut être très dangereux en particulier pour la plante, car les membranes deviennent trop perméables causant une certaine incapacité de s'alimenter. Il est donc important de connaître la quantité et la qualité des sels minéraux de l'eau d'arrosage et de l'irrigation (Lopez et al., 2003).

Les facteurs à prendre compte sont :

a) Les résidus secs:

- La quantité des substances dissoutes ou les suspensions présentes dans l'eau à utiliser.
- Connaître le volume et laisser s'évaporer dans un four à 105°C , pour pouvoir peser et exprimer leur masse en g/l (Lopez et al., 2003).

b) Contenu des sels dissous :

Peut être connu en faisant par la différence entre le résidu sec et la quantité solide en suspension qui présente des particules des matériaux que l'eau capable d'entraîner et qui lui donnent sa couleur (mesuré en g/l). Mais connaître la masse de l'ensemble de sels n'est pas suffisant, il faut savoir quels sont les sels présents dans l'eau en quelle quantité, et identifier

les cations et les anions composants. Leur détermination se réalise grâce à des colonnes d'échange, sorte de filtres chargés, capables de retenir un ou plusieurs ions caractéristiques; chlorure, carbonate, bicarbonate, sulfates, sodium, calcium, magnésium, bore. La quantité est exprimée en g/l. Si les eaux sont susceptibles d'avoir été contaminés par l'activité anthropique, il y aurait l'étude des ions ammonium, nitrate, cuivre et d'autres (Lopez et al., 2003).

Les ions toxiques les plus connus sont d'origine des eaux usées ou d'égout, ce sont généralement le bore, le chlore, le sodium (tableau 1).

Tableau 1: Niveaux de toxicité pour des ions spécifiques (meq/l).

Ions Niveaux de toxicité	Bore	Chlore	Sodium
Nul	< 1	1 – 3	> 3
Léger - modéré	< 4	4 – 10	> 10
Sévère	< 3	3 – 9	> 9

(Morris et Devitt in anonyme, 2008).

L'établissement des limites de toxicité pour l'eau d'irrigation est compliqué par les réactions qui peuvent se passer quand l'eau atteint le sol. Les éléments particulièrement dangereux de l'eau peuvent être inactivés par les réactions chimiques ou bien s'accumuler dans le sol, ces éléments sont à surveiller (Anonyme, 2008).

Mais généralement, pour caractériser l'eau, nous utilisons les valeurs de la conductivité électrique à 25°C et celles du rapport d'adsorption du sodium (SAR) qui permet de qualifier les eaux souterraines destinées à l'irrigation et les causes de salinisation du sol lors de l'utilisation de ces eaux (El Asslouj et al., 2007).

c) La conductivité électrique :

La dissolution des sels dans l'eau permet à celle-ci de conduire l'électricité, la fonction qui définit la conductivité électrique (CE) est une fonction linéaire qui dépend de la concentration en sels dissous Cs. L'équation de cette fonction est :

$$Cs/CE = 0,64 \dots (1).$$

Egalement, la somme des cations est égale qu'elle soit exprimée en milliéquivalent par litre. D'autre part, la conductivité électrique en dissolution est une fonction qui dépend de la concentration de cations et d'anions en dissolution CCA, régit par l'équation :

$$CE/CCA = 100... (2).$$

Et de (1) et (2) on va obtenir:

$$Cs/CCA = 64.$$

-Détermination de la pression osmotique P_o qui est un facteur influençant sur la salinité d'eau, et définit par l'expression : $P_o/CCA = 0,0036$.

Ces formules conduisent à connaître la concentration de chacun des ions qui la forment, mais les espèces de sels rencontrés généralement ; $NaCl$, $MgCl_2$, Na_2SO_4 , $CaSO_2$, $MgSO_4$, $Ca(HCO_3)_2$, Na_2CO_3 , $Mg(HCO_3)_2$ sont reconnus par un système en fonction de la concentration en ions :

- le nombre de charges positives est égal au nombre de charges négatives.

On considère : $CAT = \{Ca^{2+} + Mg^{2+}\}$ et $ANI = \{SO_4^{2-} + HCO_3^-\}$.

Il y a deux cas possible: $CAT > ANI$, ou $CAT < ANI$.

Si $CAT > ANI$: les sels formés seront principalement ($CaSO_2$), ($MgSO_4$), ($Ca(HCO_3)_2$) et ($Mg(HCO_3)_2$).

La différence $CAT - ANI$ est la formation de ($MgCl_2$).

Le reste des chlorures, le cas échéant, seront des chlorures de sodium ($NaCl$).

S'il y a des carbonates ce seront des carbonates de sodium (Na_2CO_3). Et comme tous les carbonates et les sulfates sont formés de sels, il n'y aura pas de sulfate de sodium (Na_2SO_4).

Si $CAT < ANI$. On considère que $ANI - CAT$ est le sulfate de sodium (Na_2SO_4).

S'il y a des carbonates, ce seront des carbonates de sodium (Na_2CO_3). Et tous les chlorures seront des chlorures de sodium. Il y aura formation de sulfate de calcium, sulfates de magnésium, bicarbonate de magnésium, et bicarbonate de calcium, jusqu'à atteindre la concentration en ANI. Il n'y aura pas de chlorure de magnésium (Lopez et al., 2003).

d) L'indice RAS ou SAR : (Relation ou rapport d'absorption du sodium).

L'index utilisé est le rapport d'adsorption du sodium (SAR) qui exprime l'activité relative des ions de sodium dans les réactions d'échange dans les sols. Cet indice mesure la concentration relative du sodium par rapport au calcium et au magnésium.

Le SAR est défini par l'équation suivante :

$$\text{SAR} = [\text{CNa}] / [\text{CCa} + \text{CMg}/2]^{1/2}$$

(C): concentration en ion en mol/m³.

Si les unités sont en meq/L, la somme de C_{Ca} + de C_{Mg} doit être divisée par deux avant de prendre la racine carrée. Et si on connaît le SAR on peut connaître Na échangeable (Couture, 2004 ; Anonyme, 2008).

Selon la conductivité et la concentration de la teneur en sels dans l'eau d'irrigation, la classification de cette dernière d'après Richard 1954 (Anonyme, 1975) est représentée dans le tableau 2.

Tableau n° 2a: Classification de la salinité des eaux:

Salinité de l'eau d'irrigation	Conductivité (micro- mhos/cm à 25°C).	Concentration (g/l).
Basse	<250	<0,16
Moyenne	250 à 750	0,16 à 0,48
Elevée	750 à 2250	0,48 à 1,44
Très élevée	>2 250	> 1,44

Tableau n°2b : Classification de l'eau a été citée par Rhoades et al. (1992).

Classe	EC en dS/m	Concentration en sels totale en mg/l	Type d'eau
Non saline	<0,7	<500	Eau potable et irrigable
Légerement saline	0,7 - 2	500 - 1500	Eau d'irrigation
Modérément saline	2 - 10	1500 - 7000	Première eau de drainage et eau souterraine.
Très saline	10 - 25	7000 - 15 000	Seconde eau de drainage et eau souterraine
Très fortement saline	25 - 45	15 000 - 35 000	Eau souterraine très salée
Saumure	>45	>45 000	Eau de mer.

1.3.2. Caractérisation de la salinité des sols:

La caractérisation des sols se fait:

- au laboratoire par la détermination du poids de quelques millimètres d'une solution ou de l'extrait du sol et après l'évaporation dans une étuve.
- au laboratoire ou sur terrain par la détermination de la conductivité électrique d'un extrait du sol ou de l'eau d'irrigation : cette méthode est plus rapide, dont chaque concentration de sels a une conductivité électrique (Anonyme., 1975).

La présence d'ions en solution est à l'origine d'une conductivité électrique c'est pourquoi cette propriété est utilisée pour caractériser les sols. Plus la quantité des sels est grande et la CE de la pâte saturée est grande (Calvet, 2003 in: Rouahna, 2007).

Le niveau de la salinité des sols peut être déterminé en prenant 0 à 6 pouces des échantillons de sol pour la mesure de la CE. Le matériel végétal de plus en plus sur le site peut aussi être utilisé comme un indicateur de la gravité de la salinisation (Majerus, 1996).

La classification des sols selon la salinité en fonction de la conductivité est démontrée dans le tableau suivant:

Tableau 3: Les classes de salinité et les valeurs de la conductivité électrique

Classes de la salinité Profondeurs du sol	Non-Saline	Faiblement Saline	Modérément Saline	Fortement Saline	Très fortement Saline
0-60 cm (0-2 pi)	<2 Ds/m	2-4 Ds/ m	4-8 Ds / m	8-16 Ds / m	> 16 Ds / m
60-120cm (2-4 pi)	<4 Ds /m	4-8 Ds/ m	8-16 Ds/ m	16-24 Ds/ m	> 24 Ds / m

* Ds / m = decisiemens par mètre

(Echevarea, sd; Dunn, 2001; Wentz, 2001)

1.3.3. La caractérisation de la salinité par observation des symptômes ou des signes précurseurs:

- Croissance soudaine des cultures, d'où des rendements élevés.
- Augmentation de l'humidité de sol au point de rendre les lieux inaccessibles.
- Apparition des mauvaises herbes tolérants au sel (comme *Kachia à balais*, *Kachia scoparia*) parmi les plantes cultivées.

Les signes deviennent plus évidents à mesure que la teneur en sels augmente (figure 07).



Figure 07: Aspect de la surface des sols salinisés (anonyme, 2005).

- croissance irrégulière des cultures et manque de vigueur des plantes. (Figure: 08-A).
- croûte blanche en surface. (Figure: 08- B).
- apparition de sels brisés au voisinage des plantes d'eau. (Figure: 08- C).
- formation de point de strie de couleur blanche sur le sol, même en l'absence de croûtes en surface. (Figure: 08-D).
- présence de végétation naturelle tolérante au sel, comme passe-pierre (*Salicorne*) (Figure: 08-E) (Erliers et al, 2006).
- évaluation de la tolérance des cultures en sol salin (Figure 08-F).

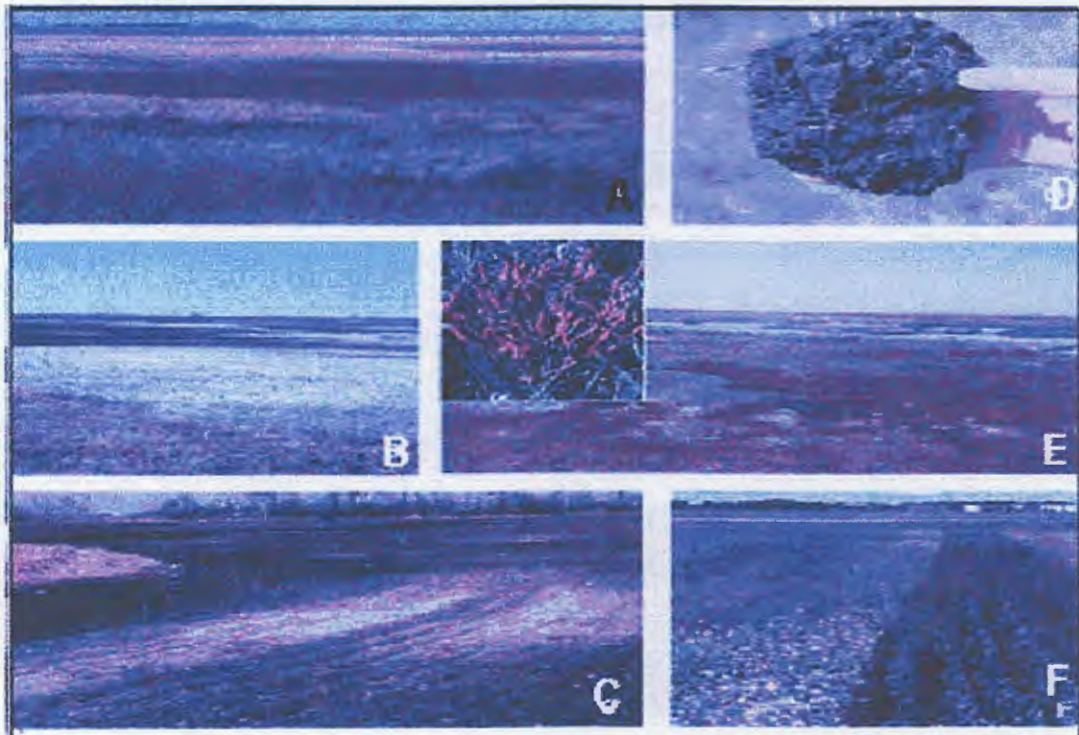


Figure 08: Les différents signes de la salinisation des sols (Anonyme, 2005).

1.4. Effets de la salinité

1.4. Effets de la salinité sur les sols

L'excès de sel dans un sol modifie ses propriétés physico-chimiques. Cette altération des conditions édaphiques constitue un stress indirect pour la croissance des plantes (exemple dispersion des colloïdes, déséquilibre nutritionnel) (Bois, 2005).

En présence de sels solubles neutres en excès, la fraction argileuse est en état floculé et donc la structure du sol est stable. Cependant, les sols salés sont plus fragiles et souvent sujet à une dégradation car la salinité réduit la couverture végétale laissant le sol sensible à l'érosion éolienne ou hydrique.

La perméabilité à l'eau et à l'air et autre caractéristique physique est généralement comparable à des celles des sols normaux (Anonyme, 2001).

D'après Mouat et al. (sd), l'augmentation de la concentration de sodium échangeable dans les sols, provoquée par l'augmentation relative de concentration de Na^+ dans des solutions salines du sol, est à l'origine de déstabilisation de la structure, une diminution de la conductivité hydraulique, la formation de croûte, et une susceptibilité accrue à l'érosion hydrique.

1.4. Effets de la salinité sur les végétaux :

La quantité de sels dans le sol que les plantes peuvent supporter sans grand dommage pour leur culture varie avec les familles, les genres et les espèces, mais aussi les variétés considérées. C'est pourquoi il n'est pas possible de définir, dans l'absolu, le seuil de salinité à partir duquel les cultures subissent un stress salin.

Les conséquences d'un stress salin peuvent résulter de trois types d'effets que le sel provoque chez les plantes:

- le stress hydrique: une forte concentration saline dans le sol est tout d'abord perçue par la plante comme une forte diminution de la disponibilité en eau. Cela nécessite un ajustement osmotique adapté, afin que le potentiel hydrique cellulaire demeure inférieur à celui du milieu extracellulaire et à celui du sol. Ce phénomène assure, d'une part, la poursuite de l'absorption de l'eau du sol et, d'autre part, la rétention de l'eau intracellulaire et le maintien de la turgescence. Lorsque l'ajustement osmotique n'est pas suffisant, l'eau a tendance à quitter les cellules, ce qui provoque un déficit hydrique et la perte de la turgescence;
- le stress ionique: en dépit d'un ajustement osmotique correct, la toxicité ionique survient lorsque l'accumulation de sels dans les tissus perturbe l'activité métabolique;
- le stress nutritionnel: des concentrations salines trop fortes dans le milieu provoquent une altération de la nutrition minérale. En particulier, vis-à-vis des transporteurs ioniques cellulaires, le sodium entre en compétition avec le potassium et le calcium, et le chlorure avec le nitrate, le phosphate et le sulfate (Levigneron et al., 1995).

Chapitre 02

Effets de la salinité sur

la nutrition minérale

2.1. La nutrition minérale

2.1.1. Introduction

Pour vivre, se développer et survivre à toutes menaces, la plante a besoins de nutriments très variés qui présentent à la fois sa source de matières et de l'énergie (Tourte et al., 2005).

Il s'agit des besoins nutritifs qui peuvent être sous deux aspects : une nutrition organique et une nutrition minérale qui rend compte le mode de l'acquisition des éléments minéraux prélevés dans le sol (Hopkins, 2003) et qui peuvent être partager entre substances principales et substances à l'état de trace en fonction des quantités liées au besoin des plantes (Billieffert et Perraud, 2003).

2.1.2. Facteurs ambiants de la nutrition

D'après Soltner (1986), les facteurs ambiants de la nutrition sont:

- Une humidité suffisante, capable d'alimenter le courant d'eau traversant les plantes, mais sans excès, pour maintenir l'aération du sol ;
- Une aération abondante, nécessaire a l'entretien de la respiration des racines, dont dépend la nutrition de la plante et sa résistance au parasitisme ;
- Un pH relativement neutre ou peu acide, favorable a l'assimilation de la plupart des éléments nutritifs ;
- Une intense activité biologique des microbes de la rhizosphère, intermédiaires nécessaires entre les éléments minéraux et organiques et les racines.

2.1.3. Les éléments nutritifs

2.1.3.1. Introduction

Selon l'origine des sels dans le sol, c'est au cours de la décomposition de la roche mère principalement, que divers éléments nutritifs sont libérés dans la solution du sol qui seront absorbés par les plantes (Hopkins, 2003). Ces dernières reçoivent aussi une grande quantité de sels minéraux et d'éléments nécessaires à leur croissance à partir de gouttes d'eau de pluie qui s'évapore de la mer et atteignent les nuages. Le Coran se réfère à cela en ces termes : **«Et Nous avons fait descendre du ciel une eau bénie, avec laquelle Nous avons fait pousser des jardins et le grain qu'on moissonne»** (Coran, 50 : 9). Ces sels apportés par la pluie sont des exemples de fertilisants utilisés traditionnellement pour augmenter la productivité (calcium, magnésium, potassium etc.). Les métaux lourds de cette sorte trouvés dans les aérosols produisent des éléments qui augmentent le rendement durant la croissance et la production des plantes (Yahya, 2007).

2.1.3.2. Les éléments nutritifs essentiels :

Chez la plupart des plantes, un nombre relativement faible de nutriments suffit à l'accomplissement du cycle de développement.

Les éléments requis pour assurer la croissance et le développement des plantes sont considérés comme étant essentiels. Le caractère essentiel est principalement fondé sur deux critères formulés par E. Epstein en 1972- Selon lui, un élément est dit essentiel si (a) en son absence la plante est incapable d'accomplir son cycle complet de développement, ou (b) les éléments fait partie d'un constituant ou d'un métabolite essentiel (Hopkins, 2003).

On distingue:

a) Les macroéléments

Sont C, H, O, N, P, S, Ca, K, Mg présents à des doses de 10^{-3} à 10^{-2} gramme par gramme de tissus secs, exception faite au quatre constituants fondamentaux, oxygène, carbone, hydrogène ou azote présents en proportion relativement élevée (Guignard et al., 1985). A l'échelle de la plante entière les prélèvements peuvent atteindre, des grandeurs de l'ordre de 100 kg/ha (quelquefois 300 kg/ha pour le potassium.) Les quantités prélevées varient d'un élément à l'autre, selon la plante, et se distribuent très inégalement entre les différents organes végétaux (Mazliak et Martin, 1995).

b) Les micro-éléments ou oligo-éléments

Les micro-éléments (Fe, Cu, Mo, Mn, B, Cl) qu'on appelle « éléments trace » sont parmi les éléments minéraux dont la plante a besoin pour accomplir ses fonctions, certaines sont nécessaires en si petites quantités (Coïc et Coppenet, 1989), se rencontrent à des doses 1000 à 10 000 fois plus faibles que les macroéléments (Guignard et al., 1985 ; Mazliak et Martin, 1995), à leur liste on ajoute le sodium, absorbé préférentiellement par certaines plantes (la betterave par exemple) mais dont le rôle sur la plante n'est pas encore mis en évidence (Soltner, 1986).

Selon Skiredj (2005), les 07 éléments sont qualifiés mineurs dont les valeurs habituellement relevées dans les analyses de végétaux sont les suivantes: Fer : 40-250 ppm (MS), Bore: 10-500 ppm, Manganèse: 15-400 ppm, Zinc : 5-200 ppm, Cuivre : 5-30 ppm, Chlore : 5-20 ppm et Molybdène : moins de 1 ppm.

Alors que les 13 éléments minéraux N, K, Ca, Mg, P, S, Fe, B, Mn, Zn, Cu, Cl et Mo sont appelés éléments nécessaires, tandis que le Na et d'autres éléments (Cobalt,

sélénium..) qui jouent des rôles bénéfiques dans la qualité de leurs produits sans qu'ils soient indispensables ; on les appelle éléments accessoires.

2.1.4. Le rôle des éléments minéraux :

2.1.4.1. Les éléments majeurs :

-L'azote :

L'importance de l'azote en tant que facteur de production végétale ne révèle pas seulement du pourcentage élevé qu'il détient dans la composition de la plante, mais plus encore du rôle physiologique primordial dévolu aux substances azotées (Khelil, 1989) ; présent dans toutes les protéines, dans les acides nucléiques, dans les cytochromes, les lipoprotéines membranaires, les porphyrines... etc., les exemples de leur omniprésence sont particulièrement nombreux. Il peut représenter jusqu'à 7 % de la matière sèche et parfois beaucoup plus à certaines périodes du cycle végétatif, comme en début de floraison (Tourte et al, 2005).

Ceci explique les symptômes de carences diverses et persistantes qui apparaissent par appauvrissement du sol ou du milieu liquide en ions nitrates (NO_3^-), ou ammonium (NH_4^+), et qui entraînent des conséquences fâcheuses pour des domaines très variés du métabolisme (Richter, 1993). En effet, c'est le constituant numéro un des protéines qui sont les composés fondamentaux de la matière vivante. L'excès de N, par temps couvert et froid, entraîne l'accumulation des nitrates dans la plante (Skiredj, 2005).

-Le magnésium:

Est un composant essentiel de la molécule de chlorophylle, mais il sert également de cofacteur à de nombreuses enzymes dont celles qui participent à d'importantes réactions de transfert d'énergie (Hopkins, 2003).

-Le calcium :

Est un constituant important des parois cellulaires où il joue surtout un rôle structurel, il est nécessaire à la fois au maintien de l'intégrité de physique et au fonctionnement normal des membranes, (Hopkins, 2003). Il favorise l'absorption sélective des nutriments (Lopez et al., 2003). Plus récemment il est considéré comme un messenger secondaire dans les réponses aux hormonales et dans certaines réponses aux facteurs de l'environnement. Entant que messenger secondaire impliqué dans la phosphorylation, il pourrait être un des facteurs de régulation des

activités de nombreuses enzymes (Hopkins, 2003). C'est un activateur des complexes enzymatiques capables d'accumuler l'énergie. (Lopez et al., 2003).

Présent dans les membranes pectiques, Il joue un rôle dans le fuseau mitotique lors de la division cellulaire et il forme des pectates de calcium dans la lamelle moyenne qui est formée au niveau de la plaque cellulaire qui apparaît entre les deux cellules filles (Hopkins, 2003).

Le calcium donne de la résistance aux tissus et favorise la formation et la maturation des fruits et des graines. C'est aussi, comme le potassium et le magnésium, un sel dissous dans les sucs cellulaires où il neutralise les acides organiques et minéraux (Soltner, 1986). Notamment, les acides ; oxalique, tartrique et citrique qui sont particulièrement abondants dans les tissus âgés. Il a donc un rôle antitoxique en soustrayant l'acide oxalique du cytoplasme (Richter, 1993).

-Le phosphore:

Fait partie des éléments plastiques, puisqu'il entre dans la constitution moléculaire des acides nucléiques et des phospholipides. De plus, c'est un constituant essentiel des cofacteurs transporteurs d'énergie (ATP, UTP, GTP, etc) et il apparaît dans plusieurs composés tel que triose- phosphate, carbamyl -phosphate, nucléosides- phosphate, etc. (Mazliak et Martin, 1995).

-Le soufre:

Élément plastique, constituant des protéines et des acides aminés cystéine, cystine, et méthionine et dans des hétérocycles de la thiamine et la biotine qui sont des cofacteurs importants des enzymes. Le groupe H-S a un rôle très grand dans les catalyses au niveau des sites enzymatiques. Dans la cellule le soufre minéral (très oxydé) est réduit avant d'être incorporé dans les composés organiques (Mazliak et Martin, 1995).

-Le potassium :

Le potassium est un élément de résistance des plantes au gel et à la sécheresse ; c'est un activateur du système enzymatique (en tant que cofacteur d'enzymes). Nécessaire à la photosynthèse. Il favorise la synthèse des glucides et leur migration vers les organes de réserve (bulbes et tubercules). Dans toutes les conditions de stress, l'apport de K permet de corriger les perturbations éventuelles (Skiredj, 2005).

Bien que cet élément soit essentiel pour toutes les plantes et qu'il soit absorbé en quantités de loin plus grandes que les autres cations, il n'entre pas dans la composition des

molécules organiques. Comme antagonistes des ions calcium (Ca^{2+}), les ions potassium déterminent le degré d'hydratation des protéines cytoplasmique. (Richter, 1993).

Il agit comme régulateur des fonctions de croissance de la plante, ce qui explique son abondance dans les tissus jeunes, et même son départ des racines vers le sol en fin de croissance. Il est nécessaire à la synthèse des protéines, son absorption est parallèle à celle de l'azote, du moins en début de végétation. (Soltner, 1986).

Il joue un rôle dans les mouvements de la turgescence comme substance osmotique, par exemple dans l'ouverture ou la fermeture des stomates, les mouvements nyctipériodiques ou l'orientation des feuilles durant la journée (Richter, 1993 ; Hopkins, 2003). Il augmenterait la résistance des végétaux à la sécheresse en limitant la transpiration, et à la verse des céréales en augmentant, avec le phosphore, la rigidité des tiges. Sa carence comme son excès augmentent la sensibilité des plantes aux parasitismes (Soltner, 1986).

Son importance est montrée par les résultats d'une étude par Mnayer (2004) sur l'effet de la fertilisation potassique sur le tubercule de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.). Le temps d'application du fertilisant potassique est de la même importance scientifique que la dose d'application.

Le rendement maximal de la pomme de terre est obtenu pour une fertilisation potassique de 300 kg/ha (traitement K3) appliquée au gonflement des tubercules (T2). Le temps d'application du potassium en stade de gonflement des tubercules (T2: 80 jours après le semis) est le meilleur si l'on compare à la fertilisation de la même dose au début de tubérisation (T1: 60 jours après le semis) (figure 09).

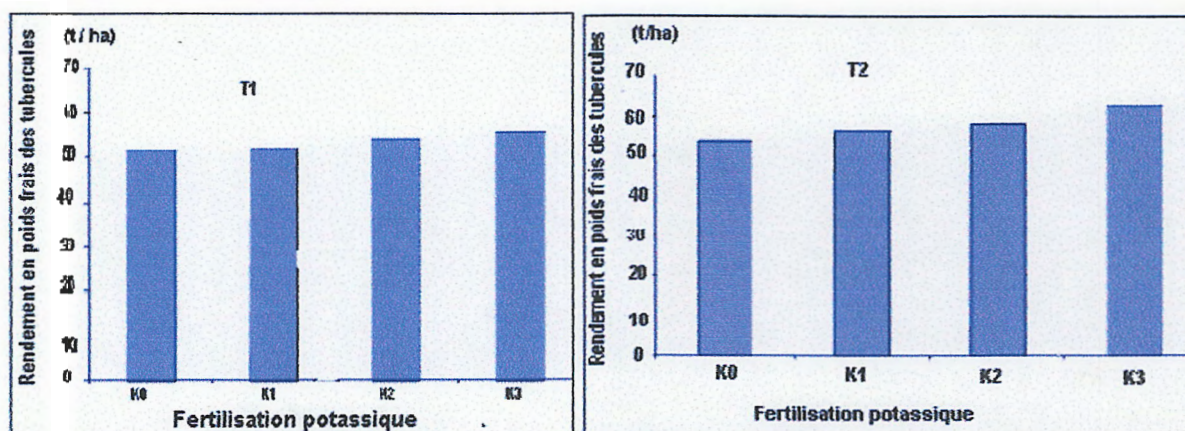


Figure 09: Effets de la fertilisation potassique et du temps d'application du potassium sur le rendement en poids frais de tubercules (chaque colonne est la moyenne de quatre valeurs par traitement).

2.1.4.2. Les éléments mineurs :

-Le sodium

Le sodium est généralement considéré comme un élément mineur, inutile mais généralement bien toléré par les plantes (Heller, 1984 in : Alexandre, 1989). Alors que, le besoin en sodium a été montré pour la première fois chez un buisson des sols salés, l'arroche vésiculeuse, (*Atriplex vesicaria*), espèce pérenne des prairies des zones arides à l'intérieur de l'Australie (Brownwell et Wood, 1957 in Hopkins, 2003).

Brownwell et Wood (1972) in Hopkins (2003), ont conclu que le sodium est généralement essentiel en tant que micro-élément chez les plantes qui possèdent une voie photosynthétique particulière (nommée voie en C4), mais non pour les plantes qui empruntent la voie connue sous le terme de voie en C3. Le rôle du sodium dans le métabolisme n'est pas encore bien élucidé, mais il pourrait intervenir dans le transport du pyruvate, un intermédiaire crucial de la voie en C4, entre le mésophile et les cellules de la gaine péri-vasculaire.

-Le fer

L'importance du fer réside dans le fait qu'il exerce deux fonctions primordiales dans la plante, il fait partie du groupement catalytique de nombreuses enzymes qui catalysent des réactions d'oxydo-réduction, d'autre part, il est nécessaire à la synthèse de la chlorophylle. Les enzymes importantes qui catalysent les réactions d'oxydo-réduction comprennent des cytochromes qui renferment de l'hème, ainsi que des protéines non hémiques à fer et à soufre (par exemple les protéines de Rieske; les ferrédoxines) qui interviennent dans la photosynthèse, la fixation d'azote et la respiration. Lors du transfert d'électrons, le fer subit une réduction réversible qui le fait passer de l'état Fe^{3+} à l'état Fe^{2+} le fer est également un constituant de plusieurs oxydases, comme la catalase ou les peroxydases (Hopkins, 2003).

-Le chlore

L'ion chlorure (Cl^-), très répandu dans la nature est très soluble. Il est donc rarement en quantité insuffisante. Comme le manganèse, le chlore est indispensable dans les réactions photosynthétiques productrices d'oxygène. Le Cl est un anion très mobile qui remplit deux fonctions principales : il est à la fois un contre-ion qui maintient la neutralité électrique à travers les membranes et il est l'un des principaux solutés osmotiquement actifs dans la vacuole. L'ion chlorure semble également nécessaire à la division cellulaire dans les feuilles et les pousses feuillées. Le chlorure est facilement absorbé et la plupart des plantes l'accumulent à des concentrations largement supérieures à leurs besoins minimaux (Hopkins, 2003).

-Le molybdène

De tous les micro-éléments connus, les besoins en molybdène sont parmi les plus faibles ; ils semblent être essentiellement en relation avec le métabolisme azoté (Hopkins, 2003). Il est composant des enzymes du métabolisme minéral et moléculaire de ce dernier: nitrate réductase et nitrogénase (Richter, 1993).

-Le bore

Il agit au niveau de la paroi et du plasmalemme en stabilisant les chélats calciques dans la lamelle moyenne et contribuerait à l'intérieur à l'intégrité de la paroi, il pourrait aussi concourir à l'insertion de certaines ATP-ases dans les membranes (plasmalemme et tonoplaste), ce qui explique son rôles dans les transports (Heller et *al.*, 1998).

-Le Manganèse

Est un cofacteur d'enzymes: alcool déshydrogénase, carbonate déshydratase (Richter, 1993). Il joue son rôle dans diverses oxydoréductions (photosynthèse), dans l'hydrolyse des peptides et certaines décarboxylations, il est présent dans la xanthine oxydase (Heller et *al.*, 1998).

-Le Zinc

Intervenant aussi bien dans la fixation du CO₂, dans le métabolisme des glucides que dans la synthèses des auxines (Tourte et *al.*, 2005), aussi dans la synthèse du tryptophane qui est le précurseur de ces hormones de croissance (Coïc et Coppenet, 1989).

-Le cuivre

Le cuivre (ion Cu^{2+/3+}) intervient dans les réactions d'oxydoréduction grâce au changement de valence, mais également dans la synthèse des auxines. C'est un auxiliaire indispensable pour les cytochrome- oxydases, les polyphénol-oxydases, et les lactases (Tourte et *al.*, 2005).

-Le cobalt :

Il intervient dans la fixation de l'azote atmosphérique par les bactéries des légumineuses, et constitue la colabamine (vit. B12) (Heller et *al.*, 1998).

2.1.4.3. Les carences:

Les carences nutritionnelles sont le résultat d'une absence continue de certains nutriments. Ceux-ci doivent être assimilables par la plante.

L'interaction de plusieurs éléments peut provoquer la non assimilation de l'un d'entre eux par la plante et son emprisonnement dans le sol. Les carences nutritionnelles se manifestent par ralentissement du développement, des rendements moins importants, une absence de pigment sur les feuilles,... etc.

Il existe des éléments appelés limitants car leur absence, ou simplement la faiblesse de l'un d'entre eux peut provoquer les symptômes cités. Les plantes soumises à une carence sont plus exposées à l'attaque de différents organismes, et maladies (Lopez et al., 2003).

Le calcaire, et plus précisément « le calcaire actif » qui conditionne l'apparition de la carence en fer (chlorose ferrique ou chlorose calcaire); l'élévation du pH des sols acides-accroissement du taux de calcium échangeable qui diminue l'assimilabilité de tous les éléments, sauf le molybdène, en déclenchant éventuellement des carences en manganèse, zinc ou bore ; une roche mère pauvre en cuivre est l'origine des carences cupriques; les sols acides de pH inférieur à 6 peuvent être carencés en molybdène (Coïc et Coppenet, 1989).

- L'Azote

Une carence aiguë d'azote se marque chez la plupart des plantes par une dégradation de la chlorophylle (chlorose), des protéines et de certains composants des acides ribonucléiques (RNA) (Richter, 1993). L'ensemble de la plante présente une végétation chétive, rabougrie, naine et retardée. Les feuilles sont d'abord vertes pâles, jaunâtres, puis elles deviennent jaunes, avec quelques fois des teintes rouges. Les feuilles âgées meurent prématurément. Il y a des perturbations dans la croissance des organes végétatifs de la plante. En général, il s'agit de carence vraie ; il faut donc la corriger par un apport d'engrais azoté au sol ou par une pulvérisation foliaire à base d'urée à raison de 2000 l de solution par ha, en solubilisant 0,5 à 2 kg d'urée /l, soit 4,6 à 18,4 kg N/ha (Skiredj, 2005).

-Le potassium

Sa carence comme son excès augmentent la sensibilité des plantes aux parasitismes (Soltner, 1986). Les premiers symptômes apparaissent au niveau des tissus les plus vieux, qui deviennent obscures, ridés et nécrosés. La plante est moins résistante aux épidémies. Normalement le potassium est présent dans le sol, mais sous une forme non assimilable pour la plante. Il peut être prisonnier des particules d'argile (Lopez et al., 2003). Les carences ne sont pas rares et s'observent surtout au niveau des organes de réserves qui ont tendance à s'atrophier avant la phase normale de croissance. On observe également un jaunissement de la périphérie des limbes foliaires, suivi d'un brunissement de la partie centrale (Tourte et al.,

2005). La synthèse de l'amidon ainsi des protéines est également affectée par des carences en potassium. (Hopkins, 2003).

-Le calcium

Lors d'une carence le bout des tiges et des racines souffrent de nécroses. Les tissus de la plante perdent leurs résistances et celle-ci courbe vers le sol (Lopez et al., 2003). La nécrose des feuilles du bourgeon terminal porte sur les pointes, si bien qu'en cas de reprise de la croissance, les feuilles supérieures manquent de pointes et de bordures saines (Mazliak et Martin, 1995).

-Le phosphore

Les sols fortement argileux fixent le phosphore sous forme de phosphates, de telle façon qu'il est très difficile pour la plante d'y avoir accès. Le calcaire bloque le phosphore, de même que les sols acides, et on aura une formation de composés de fer insolubles. Le phosphore est définitivement lessivé avec les particules entraînées sous l'action de la pluie. Les symptômes sont comme ceux de l'azote, les feuilles et les tiges bleuissent avec une diminution du volume et du nombre des graines (Lopez et al., 2003).

-Le magnésium

La carence se manifeste par une chlorose plus ou moins sévère (Tourte et al., 2005), suivie de la nécrose des feuilles, en commençant par les vieilles jusqu'à atteindre les plus jeunes. La chlorophylle ne peut pas être formée en absence du Mg. Les premiers symptômes sont suivis par une défoliation des vieilles feuilles chez les plantes ligneuses. L'absence peut être due à un excès de potassium car ce sont deux éléments antagoniques (Lopez et al., 2003).

-Soufre

Les carences en soufre, comme les carences azotées, provoquent une chlorose générale de la feuille englobant les tissus péri-vasculaires. Ceci résulte d'une réduction de la synthèse protéique plutôt que d'une réduction directe de la synthèse de chlorophylle. Pourtant la chlorophylle est stabilisée par des liaisons avec les protéines des membranes chloroplastiques. Par suite de la réduction de la synthèse protéique, la capacité de former des complexes chlorophylle- protéine stables est également diminuée (Hopkins, 2003). La chlorose entraîne une coloration générale vert pâle, les nervures sont, à peine, plus foncées que le reste du limbe (Mazliak et Martin, 1995).

-Le chlore

Les plantes carencées en chlore présentent une croissance réduite, le flétrissement des extrémités des feuilles ainsi qu'une chlorose généralisée (Hopkins, 2003).

-Le bore

Sa carence se traduit par des troubles dans le fonctionnement des méristèmes et la différenciation des organes, dans les réactions des plantes à la lumière contrôlées par les phyto-chromes et leurs sensibilité aux hormones, et dans le transport des sucres et des ions (Heller et al., 1998). La zone de croissance est infectée par une nécrose des feuilles du bourgeon terminal porte sur les bases des feuilles ; le tissu vasculaire des feuilles nécrosées noircit, et le bourgeon terminal reste vivant, les jeunes feuilles restent chlorotiques, avec ou sans point de nécroses, les vaisseaux apparaissent vert plus foncé que le parenchyme plus jaunâtre ou vert pâle (Mazliak et Martin, 1995).

-Le Zinc

Son insuffisance est préjudiciable au développement des plantes en particulier les allongements des entre-nœuds. Provoque de sévères chloroses et tend à accroître la sensibilité des végétaux à l'égard de leurs parasites. De nombreuses plantes cultivées sont sensibles à la disponibilité de cet élément (Fabacées, Céréales, etc) (Coïc et Coppenet, 1989; Tourte et al., 2005).

-Le Molybdène

Ses carences se rencontrent en sol non calcaire de pH inférieur à 6. La matière sèche des feuilles des végétaux carencés contient moins de 0,10 ppm de Mo (Chou-fleur, Luzerne). Sur le melon il y a une chlorose puis une nécrose périliminaire, et elle est inexistante sur le chou-fleur et la pomme de terre, les jeunes feuilles sont gaufrées et réduites à leur nervures principales (Coïc et Coppenet, 1989; Tourte et al., 2005). Son insuffisance conduit à une croissance lente et limitée et une fructification très rare (Tourte et al., 2005). Dans des plantes telles que les légumineuses, qui dépendent de la fixation de l'azote elle induit des symptômes de carence azotée. Lorsque les apports azotés sont satisfaisants, une carence en Mo provoque une maladie connue sous le terme de « Whip-tail » qui est caractérisée par la torsion et la déformation des jeunes feuilles (Hopkins, 2003).

- Le Fer

Sa carence souvent due à une abondance de calcium, se manifeste par des chloroses et des forts ralentissements du développement (Tourte et al., 2005). Elle est habituellement

désignée sous l'appellation de chlorose ferrique. Ces symptômes apparaissent deux ou trois mois après le débourrement des arbres fruitiers et consistent à une chlorose très sévère du limbe des jeunes feuilles qui deviennent entièrement pâles, jaunes ou blanches, avec un filet vert à l'emplacement des nervures (figure 10, 11). Dans les cas les plus graves, des plages nécrotiques brunes apparaissent en bordure du limbe, les feuilles tombent prématurément, l'arbre dépérit (Coïc et Coppenet, 1989; Tourte et al., 2005). Le jaunissement inter-nervure est un phénotype qui révèle l'impact du manque de fer sur le contenu des feuilles en chlorophylle et en caroténoïdes. La diminution de l'abondance en pigments photosynthétiques corrèle avec la perte des capacités photochimiques des chloroplastes. La carence en fer altère également la respiration mitochondriale et la fixation de l'azote atmosphérique dans les nodules des légumineuses. Ces perturbations métaboliques sont étroitement liées au fait que le fer est un métal de transition indispensable comme cofacteur de nombreuses réactions redox cellulaires. (Briat et Vert, 2004).



Figure 10: Symptôme typique de carence: nervures vertes et limbe jaune (Berger, 2008).



Figure 11: Les jeunes pousses sont toujours les premières atteintes par un manque de fer (Berger, 2008).

-Le cuivre

Les sols les plus enclins à présenter des carences en cuivre sont ceux qui sont soumis à d'intense lavage ; les sablonneux, les tourbeux et ceux qui sont à base de terre de bruyères (Lopez et al., 2003). Sa carence conduit au nanisme et à la chlorose de certaines plantes. Les agrumes et les arbres fruitiers y sont particulièrement sensibles (Tourte et al., 2005).

-Le Manganèse

Les manifestations de ses carences viennent souvent d'un déséquilibre entre les ions Mg^{2+} et Ca^{2+} lorsqu'il interfère dans certaines réactions entre eux. Cette carence est identifiable, chez les jeunes plantes par un dépérissement des cotylédons et, à l'état plus âgé,

par une synthèse anormale des anthocyanes et une chute du taux de chlorophylle (Tourte et al., 2005).

Le tableau 4 représente les éléments majeurs qui se trouvent dans le sol et dans la plante avec leur concentration et leur rôle dans la plante.

Tableau 04: les bioéléments majeurs dans le sol et dans la plante (Gobot et al., 2003).

Elément	Forme dans le sol	Concentration dans le sol (S) et dans la plante (P) (% matière Sèche)	Rôles principaux dans la plante, carence, toxicité.
N	-organique : plus de 95% du totale -NH ₄ ⁺ : forme transitoire, retenue sur le complexe -NO ₃ ⁻ : principale source d'azote pour les plantes ; Facilement lixivié.	S : 0,3 à 3 P : 5 à 50	-constituant des acides aminés, des protéines, des acides nucléiques et des lipides: -favorise la multiplication cellulaire et celle des chloroplastes -favorise la synthèse des glucides -forme des réserves dans les graines -constituant des hormones
P	-organique : dans les débris de la litière -minérale : constituant non assimilable de certains minéraux (ex : apatite) PO ₄ ³⁻ absorbé ; peu assimilable HPO ₄ ²⁻ ou H ₂ PO ₄ ⁻ libres	S : 0,1 à 1 P : 1 à 5	-constituant principale des protéines phosphorées (ex : lécithine) -constituant de l'ADN, de l'ARN et de lipides phosphorés -rôle dans le métabolisme des glucides et dans la mise à fruit -transport d'énergie dans la cellule (ADP, ATP) -migre en fin de saison vers les organes de réserve.

S	<p>-minéral des roches gypseuses, pyrite</p> <p>-oxydé en sulfate par les bactéries, à partir de sulfure ou de soufre élémentaire</p> <p>-H₂S provenant des matières organiques décomposées ou de la sulfato-réduction bactérienne.</p>	<p>S : 0,1 à 1</p> <p>P : 0,5 à 5</p>	<p>Constituant des acides aminés soufrés (méthionine, cystéine)</p> <p>-constituant de certains cofacteurs enzymatiques</p> <p>-toxique en excès, avec espèces résistantes par accumulation jusqu'à 7% de la matière sèche ou par limitation à l'absorption</p>
K	<p>Constituant de silicates (mica, feldspaths); 95 à 98 % du K d'un sol</p> <p>-rétrogradé dans les argiles</p> <p>-fixé (filament) sur le complexe absorbant.</p> <p>libre sans la solution du sol</p>	<p>S : 2 à 30</p> <p>P : 5 à 50</p>	<p>-se trouve à l'état soluble, très mobile</p> <p>-régulateur principal de la pression osmotique, donc du transit de l'eau et de la phase passive de l'absorption</p> <p>-Activateur d'enzymes</p> <p>-favorise la synthèse des glucides et leur stockage</p> <p>-très facilement lixivié des feuilles par les pluies</p>
Ca	<p>-constituant des roches calcaire.</p> <p>-« actif », en poudre fine de CaCO₃</p> <p>-échangeable sur le complexe absorbant</p> <p>-libre sans la solution du sol</p>	<p>S : 2 à 15</p> <p>P : 0,5 à 50</p>	<p>Constituant des parois cellulaires qu'il rend rigides et résistantes</p> <p>-activateurs d'enzymes</p> <p>-favorise la maturation des fruits</p> <p>.neutralise les acides organiques formés par le métabolisme</p> <p>-s'accumule dans les organes âgés (écorces, bois)</p>

Mg	-constituant des dolomites. Echangeable sur les complexe absorbant -libre dans la solution du sol	S : 1 à 10 P : 1 à 10	Constituant de la chlorophylle -activateur d'enzymes -évite la chlorose (non formation de la chlorophylle) -sélectionne les espèces si sa concentration est élevée dans le sol.
Fe	Plus de 20 composés minéraux : hématite, goethite, lépidocrocite, hydroxydes, etc. -constituant du complexe argileux humique -chélaté à la matière organique -forme ionique en solution (Fe^{2+} dans les sols anoxiques)	S : jusqu'à 40000 P : 50 à 1000	-éviter la chlorose -effecteur des processus d'oxydoréduction -constituant et activateur d'enzymes -chélaté par les sidérophores, transporteurs cellulaires -régulateur de la réduction des nitrites et de la fixation d'azote
Mn	-semblable à celle du fer	S : 200 à 4000 P : 20 à 200	-favorise la croissance et évite la chlorose. -Carence possible sur les sols basiques et toxicité sur les sols acides.; -constituant et activateur des enzymes ; -rôle dans l'oxydation de l'eau lors la photosynthèse.
Cu	-constituant de minéraux (ex. chalcopryrite $CuFeS_2$)	S : 5 à 100 P : 2 à 200 (cuprophytes)	-régulateur des processus d'oxydoréduction -constituant d'enzymes assurant la synthèse de la lignine

	chélaté à la matière organique	jusqu'à 1600)	-stimulation de la croissance -toxique à hautes concentrations, sauf pour les plantes adaptées
Zn	Constituant de silicates ferromanganèse -très peu de Zn^{2+} en solution	S : 10 à 300 P : 10 à 100	-constituant d'enzymes d'oxydation (oxydase) -synthèse de protection des hormones de croissance -aide à la synthèse de la chlorophylle
Mo	-constituant de minéraux - MoO_4^{2-} ou $HMoO_4^-$ -Fixé sur le complexe adsorbant ou libre dans la solution du sol	S : 0,5 à 5 P : 0,2 à 10	-nécessaire au métabolisme de l'azote (constituant d'enzyme nitrate réductase, ainsi que le complexe de la nitrogénase)
B	-constituant des silicates (ex. 3-4 % de la tourmaline)	S : 5 à 100 P : 2 à 100	-constituant d'enzymes -aide à la synthèse de la chlorophylle -carences fréquentes, amenant par exemple au pourrissement du cœur de la betterave ou à la lésion de l'écorce du pommier.
Al	Constituant de base de minéraux, avec Si (8 % de la lithosphère) -forme nombreuse en fonction de l'acidité du sol, entre $Al(OH)_4^-$, $Al(OH)_2^+$ et Al^{3+} (ions).	S : 50 à 200 P : 2 à 3	-favorise à de très faibles concentrations, la production d'espèce cultivées -très vite toxique dès que le pH du sol est inférieur à 5,5 -action de sélection des espèces sur sol acide ; seule les alumino-tolérantes résistent (ex. Ericacées)

2.1.5. La disponibilité des éléments minéraux :

Seulement environ 2% des ions présents dans le sol sont disponibles pour les végétaux. Les 98% restants sont sous forme de sels très peu solubles ou fortement liés aux autres composants du sol. Moins de 10% seulement des ions sont disponibles dans la solution du sol. (Nultsch, 1996).

Le chaulage, indispensable aux sols acides, peut avoir des conséquences néfastes quant à l'assimilabilité du manganèse, du zinc, du bore et il ne faut pas dépasser une certaine valeur de pH. (Coïc et Coppenet, 1989).

Certaines plantes acceptent un excès de calcaire dans le sol elles sont dites calcicoles. Elles ont la capacité de pouvoir continuer à absorber les éléments indispensables, comme le fer et le magnésium, même en présence d'une forte proportion de calcaire. A l'inverse, les autres sont dites calcifuges (Berger, 2007).

2.1.6. Mouvement des éléments nutritifs vers la surface des racines.

2.1.6.1. Introduction

Les plantes, pour la plupart, tirent du sol l'eau et les sels minéraux qui leur sont nécessaires. Les racines - qui forment l'appareil racinaire - et les poils absorbants localisés sur les plus jeunes d'entre elles, jouent pour cela un rôle essentiel. En effet, elles absorbent les éléments minéraux sous forme d'ions, soit à partir de la solution du sol, qu'ils soient libres ou piégés dans des complexes organiques particuliers (les chélats), soit à partir de réseaux colloïdaux du sol sur lesquels les éléments sont adsorbés (fixés en surface). L'absorption des ions, qui est un phénomène complexe, est sensible à de nombreux facteurs, qui tiennent, les uns à la nature de l'organisme absorbant, les autres au milieu environnemental. L'état physiologique des tissus et l'influence des paramètres environnementaux (température, degré hygrométrique, oxygénation, stress hydrique et salin,...) indiquent que, en plus de ses causes physiques, l'absorption est un processus qui est, le plus souvent, contrôlé par le métabolisme cellulaire. Les mécanismes cellulaires mis en jeu, sont très proches de ceux qui ont été observés dans le monde animal (pompes, transporteurs et canaux ioniques, phénomènes d'osmose impliquant des aquaporines des membranes plasmiques ou vacuolaires) (Moughli, sd).

2.1.6.2. Interception racinaire

L'estimation de la contribution de l'interception racinaire peut être faite sur la base des hypothèses suivantes :

- La quantité maximale d'élément nutritif interceptée est celle disponible dans le volume de sol occupé par les racines.
- Les racines occupent en moyenne 1% du volume total de sol.
- Près de 50% du volume total du sol est composé de pores. Donc, les racines occupent près de 2% de l'espace poral total.

2.1.6.3. Mass flow

Après qu'une racine s'installe dans le sol, des ions dans la solution du sol se déplacent vers les racines par mass flow. Le pourcentage du besoin en éléments nutritifs qui peut être satisfait par mass flow est fonction de :

- besoins de la plante en éléments nutritifs
- concentration de l'élément nutritif dans la solution du sol.
- quantité d'eau transpirée par la plante
- volume effectif de la solution du sol se déplaçant en réponse au gradient de potentiel, et qui vient en contact avec la surface de la racine.

2.1.6.4. Diffusion

Pour un sol à l'humidité à la capacité au champ, la diffusion vers les racines est de 0.13 cm/j pour K et 0.004 cm/j pour $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$. D'où l'importance de l'invasion de tout le sol par les racines.

Tableau 05: Importance de l'interception racinaire, mass flow et diffusion pour la production 95 qx de maïs grain sur un sol fertile (Barber, 1966 in: Anonyme sd).

Élément nutritif	Quantité totale absorbée	Interception racinaire	Mass flow	Diffusion
	Kg/ha	Kg/ha	Kg/ha	Kg/ha
Azote	190	150	38	38
Phosphore	40	1	2	37
Potassium	195	4	35	156
Calcium	40	60	150	0
Magnésium	45	15	100	0
Soufre	22	1	65	0

2.1.7. L'absorption des éléments:

En même temps que l'eau qui leur véhicule, les éléments minéraux sont absorbés du sol au niveau des racines à l'état de matières minérales solubles et dissous en ions, rendu solubles par l'action combinée des sécrétions des racines et des micro-organismes, du CO₂ dégagé par la fermentation de l'acidité du sol et des acides humiques, notant aussi que les feuilles et les parois des tiges peuvent absorber directement l'eau et les sels minéraux (Soltner, 1986).

Il existe une relation entre les éléments nutritifs en dépendance et antagonisme à travers laquelle les bioéléments coexistent dans le sol et ils s'échangent entre eux. La capacité d'absorption d'un ion par une plante est ainsi soumise, en plus des facteurs internes, à la présence et à la concentration des éléments à proximité du lieu d'absorption. Il existe donc des interactions ioniques de dépendance ou d'antagonisme, par rapport aux possibilités d'absorption (Gobot et al., 2003).

L'absorption des ions se fait principalement grâce à deux mécanismes; diffusion passive et mécanisme de transport actif. Dans le cas de transport passif, la diffusion se fait selon le gradient de potentiel électrique de l'ion considéré (Lefrac, 2003). Les ions pénètrent avec celle-ci, passivement, par diffusion libre, dans l'espace libre extérieur, dont le volume spécifique est estimé à environ 0,10 à 0,15 ml/g de masse fraîche (8-25% du volume du tissu). L'espace libre est limité par le plasmalemmes des cellules. En effet, la plasmolyse augmente nettement son volume. Le plasmalemmes est largement imperméable aux ions et aux molécules organiques (Richter, 1993).

Dans le cas de transport actif, au contraire, le gradient de potentiel électrochimique existant au repos entre le milieu extérieur et le contenu de la cellule n'est pas favorable à la diffusion de l'ion dans le sens requis pour le fonctionnement de la plante. Les mécanismes de transport actif correspondent à des spécialisations fonctionnelles de la cellule du poile absorbant (Lefrac, 2003).

Le transport actif est étroitement associé à une source d'énergie métabolique, fréquemment mais pas toujours, l'hydrolyse de l'adénosine triphosphate (ATP). En d'autres termes, un transport actif requiert la fourniture d'énergie et ne se produit pas spontanément. A la différence de la diffusion spontanée, un transport actif est unidirectionnel, soit entrant, soit sortant, de plus il est toujours effectué par un transporteur. Le rôle du transport -actif est d'accumuler des solutés dans la cellule, lorsque leurs concentrations dans l'environnement sont très faibles. Lorsqu'il est utilisé pour faire sortir des solutés de la cellule, le transport actif a pour rôle de maintenir les solutés intracellulaires à un faible niveau de concentration

(Hopkins, 2003). Chaque fois qu'un type d'ions est soumis à un transport actif, les ions de charge opposée subissent vraisemblablement un transport passif en suivant le gradient de potentiel électrique à travers les pores de la membrane. Certaines indications parlent en faveur d'un transport de ce type pour les cations. Ainsi une forte absorption de NO_3^- s'accompagne le plus souvent d'une absorption importante de cations ; toutefois cette corrélation n'est pas générale.

Les cellules corticales de la racine peuvent stocker les ions dans leur vacuole en les séquestrant par un transport actif à travers le tonoplasme. Toutefois, ce phénomène ne touche qu'une partie minime des ions, car la capacité de stockage de la vacuole est limitée (Richter, 1993). Les vacuoles ne sont pas impliquées dans le transport. La translocation des ions depuis les racines jusqu'au feuilles, se fait à long distance dans les vaisseaux et les trachéides par un transport actif (Nultsch, 1996). Les éléments absorbés peuvent atteindre les parties supérieures de la plante. La sève montante contient, en plus des ions minéraux, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HPO_4^{2-} , ou HPO_4^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , une faible quantité d'acides aminés et d'autres composés azotés, de même que des acides organiques et des sucres, qui se forment dans les racines. Chez les arbres en particulier, l'azote est souvent transporté sous forme d'amides acides et d'acides aminés, plus rarement sous forme de NO_3^- ou NH_4^+ . La quantité de substances dissoutes varie avec l'état physiologique de la plante; le pH de la sève est en général de 5,0 à 6,0. Les vaisseaux et les trachéides portent, à la face interne de leurs parois, des charges négatives, surtout des cations bivalents. Ceux-ci sont constamment déposés puis à nouveau libérés, de sorte qu'il en résulte un déplacement de cations tout à fait comparable aux processus d'échange de cations. Les cations univalents n'ont apparemment qu'une faible affinité pour les sites chargés. Ces phénomènes n'affectent ni la composition ni la concentration de la sève car l'absorption d'une partie des ions libère dans la solution une quantité dans l'ensemble équivalente d'ions (Richter, 1993).

Lorsque des plantes sont mises dans une solution nutritive à volume limitée, les concentrations des éléments nutritifs dans cette solution changent dans quelques jours (figure 12). Les concentrations du potassium, du phosphore et du nitrate diminuent nettement alors que celles du sodium et du sulfate peuvent même augmenter, indiquant que l'eau est absorbée plus rapidement que ces ions (Anonyme, sd).

Les vitesses d'absorption, surtout du potassium et du calcium, varient avec l'espèce (maïs et haricot). La concentration des ions dans la sève des racines est généralement plus élevée que celle de la solution nutritive, ce qui est évident pour le potassium, le phosphore et le nitrate.

Les substrats de croissance peuvent contenir des concentrations élevées en éléments minéraux dont la plante n'a pas besoin. Le mécanisme d'absorption doit donc être sélectif.

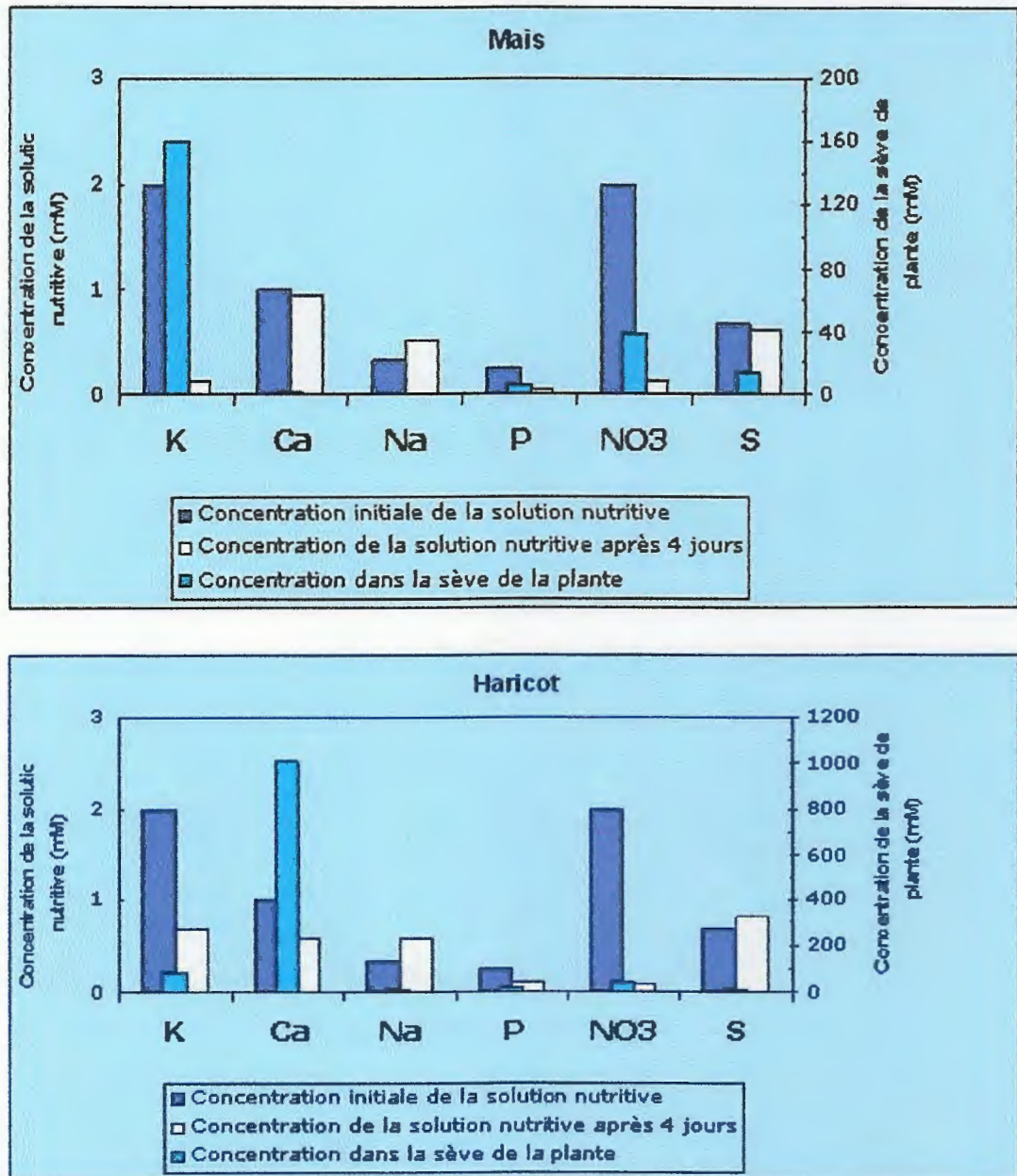


Figure 12: Changement de la concentration ionique de la solution nutritive et de la sève des racines du maïs et du haricot (Anonyme, sd)

- **Sélectivité** : Certains éléments minéraux sont absorbés préférentiellement, alors qu'il y a une certaine discrimination contre d'autres qui sont presque exclus.
- **Accumulation** : Les concentrations de plusieurs ions sont considérablement plus élevées dans la sève des cellules de la plante que dans la solution externe.
- **Génotype** : Il existe des différences entre les espèces des plantes dans les caractéristiques d'absorption des ions.

Le processus d'absorption nécessite de l'énergie générée par le métabolisme cellulaire. L'absorption des ions par les racines est influencée par plusieurs facteurs.

2.1.8. Interactions entre les ions :

Il existe entre les éléments minéraux des interactions qui font que l'action d'un élément est modifiée par la présence d'un autre.

2.1.8.1. Compétition

Les tableaux suivants montrent l'interaction entre les ions d'après Anonyme (sd)

Tableau 06: Effet d'un apport équivalent d'autre cation sur l'absorption du potassium K et du Césium (Cs) par des racines isolées d'orge (Témoin:100%).

Traitement	Absorption de K	Absorption de Cs
Témoin	100	100
Témoin+Sodium	94	84
Témoin +Potassium	54	20
Témoin+Rubidium	56	20
Témoin +Césium	97	54
Témoin+Calcium	129	118

Tableau 07: Interaction entre l'absorption de l'ammonium et du potassium par les racines de maïs.

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (mM)	Teneur dans les racines (mmol /g matière verte)			
	Ammonium		Potassium	
	-K	+K	-K	+K
0	6.9	6.7	8.2	53.7
0.15	7.3	7.1	6.7	48.4
0.50	17.1	13.5	8.9	41.4
5.00	29.4	31.5	9.3	27.1

Tableau 08. Effet de K et Ca sur l'absorption de Mg par des plantes d'orge.

Partie de la plante	Absorption de Mg (méq/10 g matière verte* 8 heures)		
	MgCl ₂	MgCl ₂ +CaSO ₄	MgCl ₂ +CaSO ₄ +KCl
Racines	165	115	15
Tiges	88	25	6.5

Tableau 09: Relation entre l'apport de nitrate et la teneur du chlore dans les feuilles de soja.

Apport (méq/l)		Teneur du chlore dans les feuilles (méq Cl/100 g de matière verte).
Chlore	Nitrate	
10	1.25	90
10	2.50	51
10	5.00	34
10	7.00	19

L'absorption de certains éléments peut nuire à celle de certains d'autres : il existe des «antagonismes » entre éléments. Le mécanisme de cette concurrence est complexe :

- Tantôt l'ion absorbé diminue l'absorption d'autres ions : il y a concurrence ionique ;
- Tantôt la présence d'un ion peut provoquer l'appauvrissement du sol en un autre : le potassium par exemple «chasse » le calcium et le magnésium du complexe absorbant.
- Tantôt enfin c'est l'élévation du pH par le calcium qui diminue l'assimilabilité de certains ions (Soltner, 1986).

a)- La consommation de luxe du potassium, et antagonismes potassium- magnésium, potassium- calcium, potassium- sodium et potassium- bore:

Des apports de potassium en milieu pauvre en cet élément améliorent le rendement. Mais au-delà de certaines doses, le rendement n'augmente plus, bien que la plante continue à absorber du potassium au-delà de ses besoins. On dit qu'il y a consommation «de luxe». (Soltner, 1986).

Outre la perte économique qu'elle représente, cette consommation excessive a pour conséquence d'entraver l'absorption d'autres éléments : le magnésium, le calcium, le sodium et le bore : la teneur de la plante en ces éléments diminue, alors que s'accroît la teneur en potasse (Soltner, 1986).

b) Antagonisme phosphore- cuivre et phosphore :

La salinité due aux fortes fumures phosphatées risque de limiter l'absorption du cuivre et du zinc, l'application de certains oligo-éléments peut, dans certains cas, rendre plus efficace les fumures phosphatées (Soltner, 1986).

c) Antagonisme azote- cuivre :

Le même effet de la limitation de l'absorption du cuivre peut être dû à l'absorption des ions nitriques (Soltner, 1986).

d) l'excès de calcium :

L'excès de Ca a pour effet, soit directement, soit par relèvement excessive du pH, de diminuer l'assimilables du potassium, magnésium, manganèse, fer, bore, zinc, et Cu (Soltner, 1986). Du fait qu'il abaisse la perméabilité des membranes biologiques, gêne l'absorption de la plupart des ions, d'où des antagonismes plus ou moins marqués. (Heller et al., 1998).

2.1.8.2. Synergie entre les ions :

Il peut y avoir synergie entre deux éléments; l'effet d'un élément est amplifié par la présence autre appelés ions synergistes.

Par exemple, l'absorption des ions phosphoriques est facilitée par le magnésium. Comme certains anions Cl^- , NO_3^- , etc., pénètrent aisément dans les racines, au contraire d'autres comme SO_4^{2-} ; la présence des premiers facilitera la pénétration des cations (K^+ , Ca^{2+}), qui seront entraînés par eux. (Heller et al., 1998).

L'effet de Ca sur le flux d'ions à travers les membranes est en rapport avec son rôle dans le maintien de l'intégrité et de la stabilité de la membrane. (Heller et al., 1998).

Etant un cation divalent, il paraît qu'il réagit avec les groupes phosphate négativement chargés des phospholipides dans les membranes et donc stabilise les membranes. (Anonyme, sd).

2.1.9. Relation anion – cation :

Du fait que l'absorption des cations et des anions est régulée différemment, des interactions directes entre ces deux absorptions n'ont pas nécessairement eu lieu. Par exemple, à des concentrations externes faibles la vitesse d'absorption d'un cation n'est pas affectée par l'anion accompagnateur et vice versa. (Anonyme, sd)

Cependant, à des concentrations externes élevées, les ions à vitesse d'absorption faibles (SO_4^{2-} et Ca^{2+}) diminuent considérablement la vitesse d'absorption de K^+ et Cl^- . (Anonyme, sd)

En effet, les causes des antagonismes sont diverses, peuvent se situer au niveau de l'absorption ou du métabolisme. Fréquemment l'antagonisme résulte d'une compétition entre certains ions pour le même mécanisme d'absorption, il est alors compétitif. C'est ainsi que l'absorption faisant intervenir des forces électrostatiques (entrée dans l'apoplasme), les ions de mêmes signes (cations ou anion) sont antagonistes. La compétition peut aussi jouer entre deux ions au niveau d'un branchement dans les voies métaboliques (Heller et al., 1998).

Quelle qu'en soit l'origine, les synergies et les antagonismes entraînent la nécessité d'un certain équilibre entre les divers composants d'une solution nutritive. A la condition de ne pas se trouver dans des valeurs extrêmes constituant des facteurs limitants. L'existence des interactions ioniques montre que les proportions entre ces composantes et les doses des différents ions sont aussi importantes à considérer que les valeurs absolues des concentrations et des doses totales. (Heller et al., 1998).

2.2. Effet de la salinité sur la nutrition des plantes :

2.2.1. Introduction

Les stress des plantes peuvent être définis en tant que n'importe quel facteur externe qui influence négativement sur la croissance de plantes, la productivité, la capacité reproductrice ou la survie. Ceci inclut des facteurs qui peuvent être largement divisés en deux catégories principales : facteurs abiotique ou environnemental et facteurs biotiques. Parmi Les facteurs abiotiques la salinité qui induit l'insuffisances ou excès de des micronutriments (les excès de Na^+ , de Cl^- et/ou de SO_4^{2-}) (Rhodes et Nadolska-Orczyk, 2001).

La quantité des sels que les plantes peuvent supporter sans grand dommage pour leur culture varie avec les familles, les genres et les espèces, mais aussi les variétés considérées. C'est pourquoi, il n'est possible de définir dans l'absolu, le seuil de la salinité à partir duquel subisse un stress salin (Levegneron, 1995).

Selon Mermoud (2006), la concentration critique en sel pour les culture est le seuil critique au dessus duquel une chute de rendement significative se manifeste (mesuré sur un extrait de pâte saturée en $C \text{ g/l} = 0,46 \text{ CE en (ms/cm)}$), par laquelle on distingue les culture selon le degré de tolérance :

- Culture sensible : $C_s = 2 \text{ ms/cm}$ ($= 1,3 \text{ g/l}$) : la plupart des plantes fruitier, fruit, quelques légumes (*carotte, haricot, salades, radis*).
- Cultures à tolérance moyenne : $C_s = 4 \text{ ms/cm}$ ($= 2,5 \text{ g/l}$) ; légumes, grandes cultures, quelques fruit (*olives, raisin, figuier, grenades*).
- Cultures tolérantes : $C_s = 8 \text{ ms/cm}$; ($= 5 \text{ g/l}$) : *prairie, coton, orge, colza, dattier, cocotier, betterave à sucre*.

Malheureusement la plupart des espèces cultivées importantes sont très sensibles aux conditions de la salinité (Hopkins, 2003).

Cependant une sensibilité différente suivant les végétaux est soulignée. En effet, d'après Calu (2006), toutes les plantes ne sont pas égales face au stress salin. Suivant leur production de biomasse en présence de sel, quatre grandes tendances ont été discernées (figure 13) :

- Les Halophytes vraies, dont la production de biomasse est stimulée par la présence de sel. Ces plantes présentent des adaptations poussées et sont naturellement favorisées par ces conditions : *Salicornia europaea, Suaeda maritima*...
- Les Halophytes facultatives, montrant une légère augmentation de la biomasse à des teneurs faibles en sel (*Plantago maritima, Aster tripolium*...)
- Les Non-Halophytes résistantes, supportant de faibles concentrations en sel (*Hordeum sp.*...)
- Les Glycophytes ou Halophobes, sensibles à la présence de sel (*Phaseolus vulgaris, Glycine max.*...).

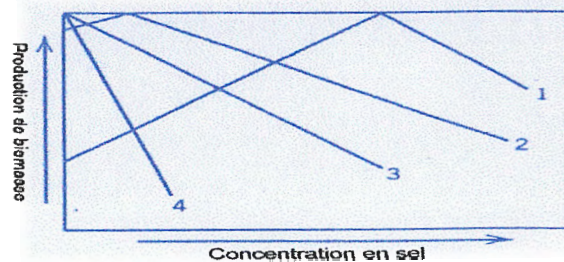


Figure 13: Production de biomasse de différents groupes de plantes suivant la salinité.

- (1) : Halophytes vraies, (2) : Halophytes facultatives, (3) : Non-Halophytes résistantes, (4) : Glycophytes (d'après Hagemeyer, 1996 in: Calu, 2006).

Levigneron et al (1995) distinguent deux types de plantes face au stress salin, le type incluser, accumulatif ou inclusif et le type excluser: exclusif.

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

- Réduction générale de la croissance: une absorption excessive de sel peut réduire la division cellulaire en affectant directement les processus de base de la croissance sans qu'une nutrition déséquilibrée ou des ions toxiques interviennent.
- Réduction de la croissance causée par une nutrition déséquilibrée en éléments essentiels: les symptômes visibles produits par un stress de salinité sont très similaires à ceux produits par un stress dû à un déficit hydrique. C'est pour ça que pendant longtemps l'effet de la salinité a été affecté à une diminution de la disponibilité d'eau résultant d'un stress osmotique dans la solution du sol, aussi, des concentration élevées d'un sel ajouté à une solution nutritives équilibrée peut causer un déséquilibre nutritionnel ou une déficience spécifique.
- Réduction de la croissance causée par des ions toxiques (Bore): 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 (Moughli, sd).

Mais il n y a pas de limite entre ces différents effets. La suppression de la croissance peut être le résultat d'effets combinés.

L'effet combiné synergique et antagoniste (interaction entre nutriments) :

C'est évident que pendant la croissance de plantes, les changements environnementaux (salinité) affectent la disponibilité d'élément aussi bien que la prise, la concentration et l'accumulation nutritives dans la plante. Les différentes espèces végétales varient non seulement dans le taux auquel elles absorbent un aliment disponible, mais également de la façon par laquelle elles distribuent dans l'espace l'élément à différents organes dans la même plante. Cependant, non tous les aliments présents dans le sol ou appliqués dans un système de sol sont disponibles. L'importance de la prise nutritive peut être évaluée du point de vue de l'accumulation de matière sèche et la lixiviation nutritive. L'interaction entre les aliments peut se produire sur la surface de racine ou au sein des plantes, de telles interactions sont

généralement évaluées comme une réponse de la croissance, soit positive ou négative. Si les combinaisons des nutriments incitent une réponse de croissance plus grande que la somme de leurs effets individuels, l'interaction est positive et les aliments sont synergiques, tandis que quand l'effet combiné soit minime, l'interaction est négative et les aliments sont antagonistes. Les interactions, peuvent mener aux déséquilibres alimentaires et donc à l'insuffisance ou à la toxicité par les éléments (nécessaires pour le bon développement de plantes) et à la diminution le rendement de récolte. Ainsi, l'insuffisance d'un élément, comme la toxicité affecte non seulement la croissance de plantes, mais induit également les changements morphologiques qui peuvent ressembler à des effets provoqués par des microbes pathogènes. En plus des problèmes impliqués par la toxicité de la déficience en micronutriment, l'âge de récolte peut être affecté à son tour. Alors que l'âge physiologique des plantes, affecte la performance de la récolte en induisant des changements du statut alimentaire dans les différents tissus végétaux et organes. Habituellement, comme l'âge de la plante progresse, le contenu nutritif diminue, sur la base de poids sec. Il dépend également de la mobilité (N, K,) ou immobilité des éléments (Ca, magnésium). Depuis dans les plus vieilles plantes, les niveaux de concentration foliaires de N, P, K,... tendent à chuter, tant que les niveaux de Ca, de magnésium, etc. augmentent, bien que de telles tendances ne soient pas uniformes le long de la section de feuille entière (Villora et al., 2004).

2.2.2. Effet sur l'absorption.

La prise des ions omniprésents de sodium est souhaitable comme manière d'établir le potentiel osmotique, d'absorber l'eau et de soutenir la turgescence, mais les ions excessifs de sodium peuvent être toxiques (Pardo et Quintero, 2002).

L'effet de la toxicité de Na^+ peut agir à l'échelle de la plante entière ou à l'échelle de la cellule, et des tissus en induisant un déficit hydrique, une toxicité métabolique, et des déficiences Nutritionnelles (Jabnoue, 2008). Ces effets nutritionnels incluent les deux actions primaires du sel sur les plantes : la toxicité directe due à l'accumulation excessive des ions dans les tissus et un déséquilibre nutritionnel provoqué par l'excès de certains ions.

Des concentrations salines trop fortes dans le milieu provoquent une altération de la nutrition minérale des plantes (Alem, 1994 in: Levigneron *et al.*, 1995). Dont elle est le plus souvent restreinte en éléments nutritifs essentiels (cas des céréales) (Soltani et al., 1990). Une fois à l'intérieur de la cellule, le sel peut causer des stress ioniques, en grande partie car le Na^+ et le Cl^- empêchent des processus métaboliques comprenant la synthèse de protéine (Hannink, 2005).

Les possibilités de l'absorption des éléments nutritifs du sol sont limitées par la croissance des racines qui peut être dû aux effets osmotiques du stress salin (Tester et Davenport, 2003). Ce dernier se traduit par la diminution du rapport partie racinaire/partie aérienne, dont son augmentation semble être une adaptation à la salinité, résultant en une absorption plus efficace de l'eau et d'éléments nutritifs en solution saline (Gorham et al., 1985 in Meloni et al., 2004).

2.2.2.1. L'absorption et l'accumulation du Cl^- et du Na^+ :

Le stress salin s'exprime par une réduction de la croissance et de la teneur en eau ainsi que de la teneur en éléments essentiels tels que le K^+ et le Ca^{2+} . En contrepartie, il y a des augmentations importantes en ions toxiques principalement Na^+ et Cl^- (Errabii, Tomader, 2007; Teakle et al., 2007). Cela peut être remarqué chez les légumineuses qui présentent une grande variabilité pour la résistance au sel, et plusieurs d'entre eux répondent à la salinité par l'exclusion du Cl^- des parties aériennes (Zid et Grignon, 1991).

En effet, Les plantes n'ont aucun besoin de Na^+ et utilisent une H^+ -ATPase donnant un gradient électrochimique de protons qui assure le transport actif des molécules à travers la membrane. Le Na^+ est, cependant, non seulement toléré, mais encore utilisé par les halophytes. (Bulmlwald., 2000).

Chez les plantes sensibles cultivées en présence de 3 ou 6 g.l^{-1} de NaCl , on observe un gradient d'accumulation de Na^+ décroissant de la base de l'hypocotyle des feuilles, qui contiennent très peu de Na^+ . Cette distribution est caractéristique de Na^+ , car elle ne s'observe pas avec Cl^- , ni avec K^+ (Cramer, 1985).

Les plantes tolérantes vont réaliser un ajustement osmotique en concentrant les sels qui s'accumulent avec le temps dans les tissus et seront toxiques pour les glycophytes (Levigneron et al., 1995). Les effets néfastes de Na^+ dans les feuilles (chez l'orge) sont réduits au minimum par son cloisonnement en vacuoles (Cl^-) et la production de solutés organiques pour l'équilibre osmotique du cytosol (Munns, 2002; Tester et Davenport, 2003).

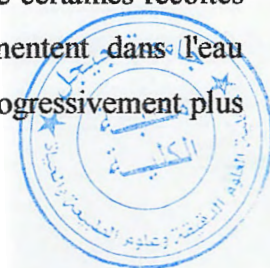
L'entrée passive de Na^+ entraîne quelques symptômes de toxicité chez les espèces tolérantes, elle cause par contre même la mort des glycophytes sensibles (Maathuis et Amtmann, 1999). Remarqué Chez certaines plantes (Luzerne) l'accumulation des ions (Na^+ et Cl^-) atteint des niveaux toxiques dans la masse foliaire. Cette accumulation entraîne une réduction de la croissance, suivie d'un dessèchement et de la mort de la plante (Mezni et al., 2002). Un déficit anionique foliaire en résulte chez les plantes sensibles, dû aux ions Cl^-

qui inhibent l'absorption et le transport à longue distance des anions indispensables, causant un déficit en alimentations en ces anions qui peut être estimé par la différence entre la teneur globale en cations majeurs (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+) et la teneur en Cl^- (Zid et Grignon ; 1991). L'effet toxique de ces ions se trouve atténuer par le phénomène de dilution par la croissance (remarqué chez les variétés locales de luzerne). (Mezni et al., 2002).

La concentration élevée de Na^+ et de Cl^- dans la solution de sol peut diminuer des activités des ions et produire des rapports extrêmes de $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$, de Na^+/K^+ , de $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ et de $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^-$. La salinité peut causer une combinaison des interactions complexes affectant le métabolisme ou la susceptibilité aux dommages de la plante. (Turan et Sezen. sd).

Distinguant ainsi que certaines interactions sont simples (par exemple les interactions entre Na^+ et Ca^{2+}), tandis que d'autre sont complexes (par exemple les carbonates, et de leurs effets par augmentation du pH du sol) (Tester et Davenport, 2003).

Révélaient que le problème de la salinité (cas de blé) est compliqué par des insuffisances minérales (Zn, P), la toxicités (Fe, Al, acides organiques) et la sécheresse et que ces stress de sol varient dans la grandeur et les interactions en fonction du temps et de l'endroit (Gregorio et al- 2002). C'est à dire qu'en plus de la concentration en sel et la composition des ions de la solution saline, le sel préjudice dépend de la période de temps pendant lesquelles les plantes sont exposées à des conditions salines . (Munns, 2002). Car les ions Na^+ et Cl^- absorbés sont transportés aux feuilles où ils s'accumulent pendant la transpiration. Les ions s'accumulent dans la plus large mesure possible dans les parties où la perte d'eau est la plus grande, habituellement dans la feuille incline et ses bords. L'accumulation aux concentrations toxiques prend du temps et des dommages visuels sont souvent lents pour être notés. Le degré de dommages dépend de la durée de l'exposition, de la concentration par l'ion toxique, de la sensibilité de récolte, et du volume de l'eau transpirée par la récolte. Dans un climat chaud ou une période chaude de l'année, l'accumulation est plus rapide que si la même récolte était cultivée dans une saison plus fraîche de climat où elle pourrait montrer peu ou pas de dommages. La toxicité peut également se produire de l'absorption directe des ions toxiques par des feuilles humides par les arroseuses aériennes. Le sodium et le chlorure sont les ions primaires absorbés par des feuilles, la toxicité peut être un problème avec certaines récoltes sensibles telles que le citron. À mesure que les concentrations augmentent dans l'eau appliquée, les dommages se développent plus rapidement et deviennent progressivement plus graves. (Ayers, R.S et Westcot, D.W., 1994).



2.2.2.2. Effet sur l'absorption et l'accumulation du Ca^{2+} et du K^+ :

Le chlorure présente une prise inférieure que le sodium qui s'accumule préférentiellement dans les racines et cette accumulation se produit aux dépens de la prise de potassium dans les plantes de chêne commun. Cela paraît qu'elles ont un pouvoir de compartimenter mieux le sodium que le chlorure quand la concentration en NaCl augmente dans la culture moyenne (Alaoui-Sossé et al., 1998).

Tozlu et al. (2000) ont constaté que les ions de Cl chez *Trifoliata de Poncirus* étaient plus toxiques dans des tissus de feuille et les ions de Na aient été au moins en tant que toxique dans les tissus fins de racine.

La charge en K^+ et en Ca^{2+} est également réduite par la salinité. Par ailleurs, les niveaux d'accumulation de Na^+ sont nettement plus faibles que ceux mesurés sur les feuilles âgées des plantes entières. Ces perturbations ioniques ont peu d'effet sur la production de matière sèche des calcs. Ainsi, les calcs cellulaires sont moins sensibles à la salinité que les plantes intactes. Cette différence de comportement suggère fortement que la sensibilité de la plante entière à la salinité est plus liée à l'intégration des fonctions physiologiques dans l'organisme entier qu'à des caractéristiques exclusivement cellulaires (Zid et Grignon, 1991).

En ce qui concerne les concentrations en Na^+ dans les tissus végétaux, ce sont les espèces à feuillage persistant, le lierre et la ronce, qui révèlent les plus fortes teneurs, sans doute parce qu'elles présentent deux voies de contamination (les feuilles et les racines). L'augmentation des teneurs en ion sodium, conjointement à celle des teneurs en ion calcium, conduit à partir d'un certain seuil, à une inhibition ou une limitation de l'absorption d'autres éléments essentiels à la plante. Na^+ et Ca^{2+} entrent notamment en compétition avec K^+ et Mg^{2+} (Badot et Crini, 2007). Soltani et al., 1990, rapportent que c'est les ions Na^+ qui perturbent l'absorption des cations (Ca^{2+} , K^+), alors que l'accumulation excessive du chlore diminue l'absorption des anions indispensables, tel que les sulfates.

Notant toujours que toutes les plantes ne réagissent pas de la même manière à la salinité. Car même la croissance des halophytes succulentes peut être empêchée par le potassium excessif en l'absence du sodium. Quelques espèces, y compris le soja, avocat, vitis et espèces de citron, sont particulièrement sensibles au chlorure (Blum, 1988 in : Gorham, 1993).

Çiçek et Çakırlar (2002) ont trouvé que les quantités de K^+ n'ont pas changé de manière significative avec l'augmentation du stress, chez les deux cultivars de maïs étudiés.

Alors que Hajji (1980) a constaté que l'absorption de k^+ chez le laurier rose peut même s'arrêter complètement suite à un stress salin (Hajji, 1980).

Tozlu et al. (2000) en travaillant sur *Poncirus trifoliata* trouvent qu'en réponse à la salinité, le K entre la plupart d'autres éléments a été affecté, diminuant ainsi dans les tissus racinaires et augmentant dans les tissus foliaires. L'absorption des nutriments chez le coton (*hirsutum de Gossypium L*) peut être affectée par le remplacement du K par le Na (Zhang et al., 2006).

La capacité d'absorption ionique, déterminée génétiquement, diffère considérablement avec les espèces et les variétés. Une composante nutritionnelle qui est l'efficacité avec laquelle l'élément nutritif est absorbé est utilisée pour les besoins de la croissance. Certaines plantes montrent une sélectivité ionique qui est l'efficacité de l'utilisation du potassium en présence d'excès de NaCl. Là une grande variabilité se manifeste au sein des espèces et de variétés. Une corrélation positive existe entre la croissance et entre la vitesse d'absorption de K^+ et son efficacité d'utilisation (qui est définie par la quantité de biomasse produite par unité de K^+ absorbé) Alors que l'influx de K^+ n'est pas corrélé à la croissance. (Zid et Grignon ; 1991).

Concernant le calcium, le composant ionique du stress salin déplace le Ca des membranes des cellules des racines (cas de *maïs*) (Lynch et al 1987).

Prieto (2005) rapporte (selon Saure, 1998) que les niveaux modérés de stress peut augmenter la tolérance des plantes au stress, par la formation temporaire d'acide abscissique (qui est connu comme l'hormone du stress), ce qui réduit l'activité de la gibbérelline et, par conséquent, la promotion de la quantité de Ca et un maintien un niveau élevé de son concentration dans les parties apicales des fruits malgré l'apparition parfois des nécroses, ce qui fait penser à l'excès ou le manque d'autre élément nutritif causé par la salinité.

Toutefois le Ca joue dans la croissance des plantes soumise au stress salin un rôle protecteur contre les effets néfastes. Cet ion réduit les effets inhibiteurs d'une forte salinité sur le transport ionique chez les plantes. En effet, un supplément de Ca^{2+} dans le milieu de culture corrige les effets dépressifs de la salinité sur la croissance (Levigneron et al., 1995), probablement en facilitant la sélectivité supérieure de K^+/Na^+ (Shabala et al., 2003).

2.2.2.3 Effet sur l'absorption et l'alimentation en azote:

Plusieurs processus biochimiques sont touchés par la salinité, en particulier l'assimilation du nitrate qui est la source la plus importante d'azote pour les plantes cultivées. Il a été rapporté que l'absorption de nitrates dans plusieurs plantes supérieures est en rapport aux différents systèmes de transport. Une forte affinité du système saturable fonctionne à peu de concentrations de NO_3^- , alors qu'une faible affinité système linéaire fonctionne à hautes concentrations de NO_3^- . Le nitrate réductase catalyse la première étape d'assimilation du nitrate dans les plantes supérieures et d'algues, ce qui semble être une limitation dans le processus d'acquisition de l'azote dans la plupart des cas. Bien que le processus qui implique l'assimilation de l'azote soit bien connu et les informations concernant les effets de la salinité sur eux sont limitées et controversées (Meloni et al., 2004).

Plusieurs études ont rapporté que l'accumulation excessive du chlore diminue l'absorption des anions indispensables à la croissance et au développement des végétaux en particulier les nitrates et les nitrites. L'assimilation de l'azote nitrique, bien que diminuée en présence de NaCl, reste localisée en majorité dans les feuilles; qui accumulent l'ion NO_3^- par un transport lent et ralenti, et Cl^- devenant alors l'ion majoritaire. Chez l'orge, la fourniture en NO_3^- ne satisfait plus les besoins de la croissance. Cependant, Celle de K^+ , quoique très réduite, paraît suffisante (Slotani et al., 1990).

La salinité interfère avec l'acquisition et l'utilisation de l'azote. Les conditions salines peuvent influencer sur les différentes étapes du métabolisme de l'azote, tels que l'absorption, réduction et la synthèse des protéines, qui est responsable à la réduction de taux de croissance de la plante. (Meloni et al., 2004).

La salinité affecte l'absorption des nitrates à deux niveaux: en concurrence directe avec les chlorures de nitrate et au niveau de la membrane et / ou les protéines membranaires en changeant l'intégrité du plasmalemme (Cramer et al., 1985).

De même Le Haricot répond à la salinité en diminuant le nombre de nodules et la fixation de l'azote (Tejera et al., 2005).

Les plantes peuvent absorber NO_3^- par un système racinaire sur le milieu témoin non salin accumulent 2,5 à 03 m mol/g Ms de N protéique dans les parties aériennes. Par contre, si l'absorption de NO_3^- ne peut se faire que par des racines en présence de NaCl, les niveaux d'accumulation de N réduit et de N protéique dans les parties aériennes sont abaissés d'environ 40 %. Un phénomène analogue s'observe dans les racines. L'accumulation de NO_3^- est plus dépendante des limitations de l'absorption de cet ion que ne le sont les accumulation

de N réduit et N protéique ; par exemple : lorsque la plante est obligée d'absorber NO_3^- en présence de NaCl, la teneur des parties aériennes en NO_3^- est dix (10) fois plus faible que dans le traitement où l'absorption est possible dans le milieu non salin.

Le chlorure de sodium agit sur la nutrition azotée, l'orge limite l'approvisionnement en NO_3^- par l'effet direct sur les racines, ceci abaisse la teneur en composés azotés. Il est capable d'améliorer le rendement d'utilisation de l'azote soluble réduit par la croissance ainsi à une économie qui limite la baisse de la croissance. Il est possible que Na^+ et Cl^- remplacent des composés azotés utilisés comme osmoticum et le libèrent pour la synthèse protéique (Soltani et al., 1990).

Chez les plantes sauvages, lorsque la concentration externe en nitrate chute à une valeur faible (0,1 mM) en présence d'une concentration élevée d'ammonium (1 mM), la répression exercée par le nitrate est levée, Ceci permet à la plante de maintenir une absorption significative de nitrate, et d'éviter ainsi les effets néfastes d'une nutrition essentiellement ammoniacale (Krouk et Gabriel G, 2006). Ces effets apparaissent si des quantités excessives de sel entrent dans la plante (chez l'acacia) en induisant une chlorose, et finiront par augmenter à des niveaux toxiques dans les anciennes feuilles, ce qui provoque la sénescence prématurée (Munns, 2002).

2.2.2.4 Effet sur l'absorption et la nutrition en phosphore:

L'assimilation du phosphore est moins affectée chez les plantes à symbiose mycorhizienne qui développe les mécanismes physiologiques et biochimiques nécessaires pour la mobilisation du phosphore du sol (Smith et al., 1998, Hatimi et al., 1997 in Ben Khaled, 2003). En réponse du P à la salinité est semblable à celui du K, ses niveaux baissent dans les tissus des racines de *Poncirus trifoliata* et augmentent dans ceux des feuilles avec l'augmentation de la salinisation (Tozlu et al, 2000). La carence en phosphore chez le cocotier est plus marquée lorsque la contrainte du stress salin est associée surtout à l'acidité qui traduit une réduction de la surface foliaire qui est une cause de la réduction de la production. (Diep et al., 1995).

Dans la plupart des cas, la salinité diminue la concentration de P dans le tissu végétal, Par contre, les résultats de quelques études ont indiqué que la salinité n'exerce aucun effet sur la prise de P. (Turan et Sezen; sd)

2.2.2.5 Effet du type de sels:

La salinité Modérée provoque des déséquilibres dans la concentration et la distribution cationique aux divers organes de la plante sans provoquer la diminution de la transpiration des plantes (exemple: poivre). La salinité causée par Mg provoque de fortes inégalités et induit une plus grande apparition de nécrose apicale que la salinité due à Na. (Prieto, 2005).

Chez *Arabidopsis thaliana*, la variabilité de l'effet de sel dépend des cations (Na^+ ou K^+) que leurs anions associés (Cl ou SO_4^{2-}). Lors d'une culture dans un milieu basique complétés avec 12.5 millimètres de Na_2SO_4 , 12.5 millimètres de K_2SO_4 , 25 millimètres de NaCl , ou 25 millimètres de KCl et en présence d'un milieu témoin sans sel, du sodium a été principalement accumulé dans les parties aériennes où il a été probablement compartimenté dans des vacuoles, il paraît qu'il participe à l'ajustement osmotique. La sensibilité de croissance aux traitements par sel de K^+ a été associée à l'accumulation excessive de K^+ dans les tissus végétaux du fait que la croissance de la plante a été diminuée davantage par des sels de K^+ (KCl et K_2SO_4) que par des sels de Na^+ (NaCl et Na_2SO_4), et plus par K_2SO_4 que par KCl . (Mahmoudi, 2008).

Les analyse inorganique chez l'arachide (*Arachis hypogea* L.) indique que NaCl et le Na_2SO_4 causent l'accumulation du Na, du P, du Fe et du manganèse dans la racine, la tige, la feuille. Le traitement de NaCl cause l'accumulation du Cl dans ces pièces. La prise de K est entravée par les deux sels tandis que la prise de Ca est retardée principalement par Na_2SO_4 . (Chavan et Karadge; 1980).

Chez l'haricot vert et à une salinité supérieure à 2.5 et 5 dS/m, la teneur en Na, du Ca, du Fe et du Mg est élevée tandis que ceux de N, de K, de Cu et de Zn montre des concentrations plus basses. Notant que le Phosphore et le manganèse ont montré une réponse différentielle, ce que fait que le métabolisme inorganique normal est perturbé par les sels de sodium qui avérées inhibiteur, résultant ainsi un abaissement du contenu de la chlorophylle par le NaCl tandis que vis-à-vis Na_2SO_4 ce paramètre n'est pas touché. (Bhivare et Nimbalkar ; 1984).

Le diagnostic foliaire des cocotiers (*Cocos nucifera* L) cultivés sur les sols sulfatés salés traduit une carence en phosphore avec une teneur très faible (de 0.096 à 0.118 %). La carence en calcium peut être moins marquée sur les sols sulfatés salés. Notant que, la teneur

en sodium des feuilles du cocotier adulte peut ne pas être liée à la salinité du sol. Mais en présence du sodium dans le sol, il existe une accumulation du sodium dans les racines, c'est également le cas pour les feuilles. En présence du chlorure de sodium, les feuilles des jeunes cocotiers présentent une augmentation de leur teneur en sodium très différente de celle constatée chez le cocotier adulte, elle est marquée dès que la salinité atteint 5‰ et varie peu avec l'augmentation de la salinité.

Ceci montre que le comportement du cocotier en présence de NaCl est très particulier : la teneur en sodium des racines, spécialement les grosses, augmente avec la salinité alors que la teneur des feuilles atteint un palier dès que la salinité atteint 5 ‰ et n'augmente plus avec les taux croissant jusqu'au 25 ‰. Lorsque la contrainte salinité s'ajoute à l'acidité, la baisse de la production se traduit également par la réduction de la surface foliaire, l'accumulation de Al^{3+} , Fe^{3+} et Na^+ dans les racines et par la carence en phosphore et en calcium. Cependant la teneur importante de Na^+ diminue l'activité des ions Al^{3+} . La racine du cocotier joue un rôle de filtre très important dans le milieu au détriment de sa croissance ce qui traduit par la une diminution plus importante du rapport feuilles/racines (Diep et al., 1995).

2. 2. 2. 6. La salinité améliore le rendement et la qualité du fruit:

Selon une étude faite sur une variété de *curcubitacées* (*Cucurbita pepo* L. var. *Moschata*) cultivés en pots sous serre ont été fournis avec différentes quantités de NaCl, il a été démontré que la concentration foliaire en Cl, Fe, Mn et Zn augmente en réponse à l'augmentation des niveaux des niveaux de NaCl en présence d'arrosage à l'eau de robinet. Les concentration d'accumulation atteignent la plus haute valeur au niveau des fruits lors la plus forte concentration (80 Mm) NaCl. Vu ce résultat, cette dernière peut être utile pour une forte augmentation de la densité en micronutriments dans la partie comestible de la plante et l'augmentation du rendement du fruit (Villora et al ., 2000).

Sans toutes ces considérations, au dépend principalement des facteurs externes, la croissance et l'alimentation de plantes dépendent également des facteurs génétiques.



Chapitre 03

Stratégies d'adaptation des

végétaux au milieu salin

3.1. Stratégies de réponses au stress:

Il existe différentes stratégies de réponses au stress

- Stratégie d'échappement: la totalité du cycle biologique est réalisée en dehors de la présence physique des facteurs stressants.
- Stratégie d'adaptation: réponses génétiques, acquises, héréditaires qui permettent à la population de s'ajuster à son environnement.
- Stratégie d'acclimatation: se rapporte à des modifications physiologiques non héréditaires, qui interviennent au cours de la vie d'un individu. Le processus d'acclimatation à un stress est appelé résistance (Hopkins, 2003).

3.2. Principe général d'adaptation :

Levitt (1980), distingue deux types d'adaptation :

3.2.1. L'adaptation élastique (ou capacité d'adaptation) concerne un organisme adapté qui peut vivre, croître et réaliser son cycle de vie en présence du stress.

3.2.2. L'adaptation plastique (ou résistance à l'adaptation) inhibe la croissance et ainsi tous dommages irréversibles éventuels jusqu'à la disparition partielle ou complète de l'agent stressant. Si l'adaptation est élastique, elle engendre des stratégies de résistance particulière. Il existe deux stratégies de résistance :

3.3. La résistance par exclusion et la résistance par tolérance/inclusion

3.3.1. La résistance par exclusion (« *stress avoidance* » en anglais) souvent réduit au terme de résistance. L'organisme inhibe ou réduit la pénétration du stress (exemple : substance toxique) dans ses tissus. L'organisme augmente ainsi le niveau de tension interne nécessaire pour un même stress.

3.3.2. La résistance par tolérance/inclusion (« *stress tolerance* » en anglais) souvent réduit au terme de tolérance. L'organisme absorbe l'agent stressant pour rétablir l'équilibre thermodynamique avec son environnement sans subir de blessure irréversible tout en poursuivant sa croissance. L'organisme réduit ainsi la tension interne pour un même niveau de stress (Levitt, 1980 in :Bois, 2005).

3.4. Mécanismes de réponse au stress

De multiples adaptations à haut concentration en Na^+ fonctionnent simultanément dans une plante, et les mécanismes de tolérance montrent de fortes variations taxonomiques. Ces mécanismes peuvent se produire dans toutes les cellules de la plante, ou peuvent se produire dans certains types de cellules, ce qui reflète les adaptations à deux grands niveaux d'organisation: celles qui confèrent une tolérance à des cellules individuelles, et ceux qui contribuent pas à la tolérance de cellules en soi, mais de la plante entière (Tester et Davenport., 2003).

Li et. Zhang (2008), ont résumé les voies de réponse au stress salin dans la figure 14 dont les détails seront développés au fur et à mesure :

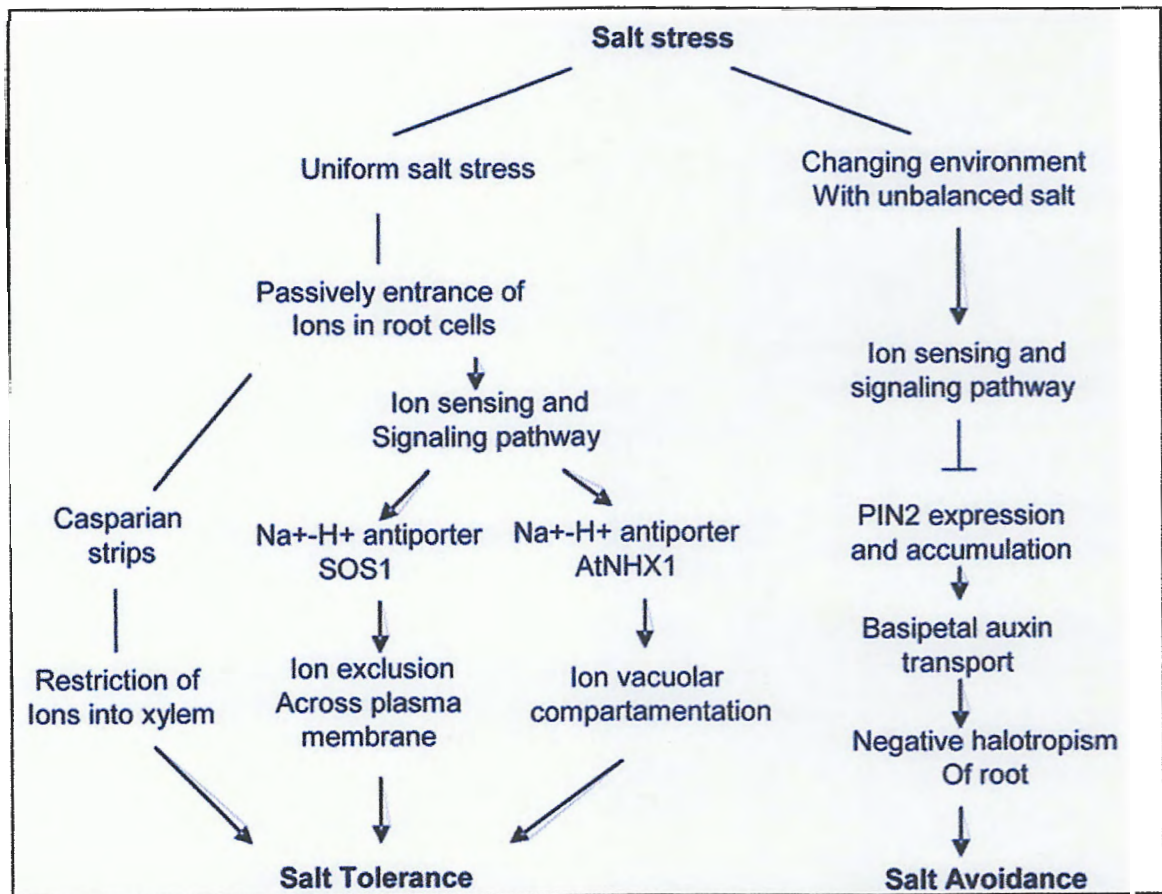


Figure 14: Un modèle d'illustration de la détection et réponse par la racine des plantes, une fois développé dans différentes conditions salines.

Ce modèle propose deux mécanismes importants aux réponses des plantes au sel, où la tolérance au sel est la capacité de fonctionner sous stress; L'action d'éviter le sel est la capacité de rester à partir du stress salin en s'élevant dans le changement des conditions salines (Li et. Zhang, 2008).

Levitt (1980), emploie l'action d'éviter et la tolérance pour l'aspect spécifique des réponses des plantes aux stress. La résistance peut être réalisée ainsi par de diverses combinaisons des mécanismes d'action d'évitement et de tolérance (Batanouny, 1993) ; la capacité que de nombreuses plantes possèdent. Les mécanismes d'évitement réduisent l'impact d'un stress bien qu'il soit présent dans l'environnement (Hopkins, 2003).

3.4.1. Mécanismes d'évitement :

L'action d'éviter a été employée dans deux sens, dont le premier est la prévention ou l'évasion du stress. Les exemples de l'action d'éviter le stress seraient des annuaires éphémères qui évitent de s'élever aux saisons de l'année, et des arbres profondément enracinés tels que le Prosopis et le Tamarix qui peuvent obtenir l'eau (et souvent moins d'eau saline) en profondeur, ces plantes peuvent échapper totalement au stress (Levitt., 1972 in Gorham; 1993; Hopkins, 2003).

Cette stratégie d'adaptation par l'évitement et d'échappement est adoptée par les plantes pour le maintien d'une teneur en eau relative élevée par la diminution de la conductance osmotique (Nabil, 2007) dont le type de plantes tolérantes est le facultatif qui évite le sel dans l'environnement (saisonnier) (Cluster, 2006).

Un comportement d'évitement du sel, qui est un mécanisme actif d'adaptation pour les plantes cultivées sous conditions salines est proposé par Li et Zhang (2008) qui constatent chez l'arabidopsis, la modification de la direction de la croissance des racines induite par le sel. En outre, une salinité élevée stimule également la modification de la croissance gravitropique des pousses. Ces résultats montrent que les plantes ont une sensation très fine de perception et un système de communication qui permet aux plantes une mutation rapide et efficace face à son environnement.

3.4.2. Mécanismes de tolérance :

Les plantes adoptent la tolérance comme stratégie vis-à-vis le sel, en supportant des potentiels hydriques bas par des modules d'élasticité élevés tout en maintenant la turgescence des cellules par diminution du potentiel osmotique (Nabil, 2007) et cela s'effectue par l'augmentation de la résistance aux sels des tissus (cellules et organes), la production des protecteurs, l'adaptation spécifique des ions de cytoplasme, l'ajustement osmotique et l'augmentation de halo- succulence ; succulence de feuille et de tige (Batanouny, 1993).

Zhu (2001) a étudié la tolérance des plantes au sel dont la stratégie est de maintenir l'homéostasie, la détoxification et la division et l'expansion des cellules (régulation de la croissance) (Figure 14).

3.5. Aspects et stratégies d'adaptation au stress salin:

Contre les méfaits du sel, la défense des végétaux s'exprime par des différences d'aspects : le milieu halophile provoque une modification de la structure anatomique, principalement la succulence, tandis que la sécheresse favorise le développement de poils, d'épines et de sclérenchyme (Simonneau et Aubert, 1963).

Les adaptations des plantes à la salinité sont de trois types distincts : la tolérance osmotique, l'exclusion de Na^+ ou du Cl^- , et la tolérance du tissu en accumulant Na^+ ou Cl^- sous multiples aspects (Munns et Tester, 2008).

3.5.1. Aspect d'adaptation morpho- anatomique:

La flore du désert montre une gamme des dispositifs morphologiques et anatomiques dans des conditions salines normales et simulées. Les caractéristiques morphologiques incluent de plus petites feuilles, stomates rares, plus grande succulence, cuticule épaisse et dépôt de cire (Wahid, 2003), et appareil aérien fruticuleux ou turgescent, structure par laquelle se distingue un halophyte d'un glycophyte, et qui est adaptée dans le sens d'économie de l'eau, elle ressemble aux xérophytes, mais ne résiste qu'à une sécheresse légère et passagère ; à l'inverse des xérophytes qui ne présentent pas généralement de résistance à la salinité (Heller et al., 1998).

Les caractéristiques anatomiques incluent les trichomes et les glandes sécréteurs de sel au niveau de feuille, profondément et posé à l'épiderme et bien développée des tissus stockant l'eau dans le cortex de la tige, la réduction du secteur cortical, élargissement de la bande de caspari et augmentation du développement des endodermes des racines. De ces derniers, le plus important est des trichomes sécréteurs de sel et des glandes de sel. Avec peu des différences structurales, leur fonctionnement est semblable et sont associés à la sécrétion des ions (Wahid, 2003).

3-5-1-1 Détoxification par l'accumulation de sel dans les parties aériennes spécifiques puis Excrétion sur la surface foliaire :

L'excrétion de sel est considérée comme stratégie adaptative réglant la concentration en ion de tissu végétal (Toderich et al., 2002; Ricklefs et Miller, 2005). Les plantes halophytes,

adaptées aux endroits riches en sels (bords de la mer, déserts salés), présentent des dispositifs assurant l'élimination des ions superflus, indésirables ou absorbés par contrainte : ce sont des glandes salines ou des poils excréteurs, qui couvrent la surface supérieure des feuilles, souvent en grand nombre ; ils sont typiques surtout des familles des Plumbainaceae, et des Frankeniaceae, ainsi que des genres *Avicennia*, *Aegialitis*, *Spartina*, *Tamarix* et *Limonium*, suite à leur activité glandulaire, ils sont couverts d'une couche de cristaux (Richter, 1993).

Ces glandes sont en fait des pompes à ions, et l'un des principaux moyens d'exclure les ions de sel dans les végétaux tolérants. Elles se trouvent dans un certain nombre de graminées (C4), y compris bermudagrass, zoysiagrass, Buchloé faux-dactyle, salt grass (*Distichlis spicata* var. *stricta*), (*Sporobolus* spp.), Gramagrasses (*Bouteloua* spp.), (*Hilaria belangeri*) (Marcum et al., 2003).

Elles sont localisées sur l'épiderme et presque sur toutes les parties aériennes des plantes halophytes se concentrent plus sur les feuilles, mais, non tous les halophytes ont des glandes de sel (Seaman, sd, disponible en ligne).

L'excrétion des ions se fait activement et veille au maintien de l'équilibre du bilan ionique (Nultsch, 1996; Schongalla, 2002). Ce processus actif, dépend de l'activité métabolique des glandes et de leur production d'énergie, il est en outre sélectif. Chez *Limonium*, le Cl^- est sécrété sélectivement et activement, alors que le Na^+ parvient à l'extérieur par un co-transport passif (Richter 1993). Les dépenses d'énergie de pompage d'ions sont nécessaires pour l'exportation de sodium (à partir de glandes), et le partitionnement (mouvement de sodium de plus en plus loin de tissus) (Bohnert, 2001).

Les véritables glandes salines sont fréquentes chez les halophytes. Chez Chénopodiacées et quelques espèces de Poaceae (Graminées), elles sont très simples, réduites à deux cellules, les structures glandulaires sont habituellement bicellulaires, comportant des cellules basiques et couvrent la cellule, et désigné sous le nom des glandes, des trichomes ou des micro-hairs de sel (Toderich et al., 2002). Elles atteignent une certaine complexité chez le *Tamarix*, les cellules sécrétrices (8 cellules) de ces glandes ont de nombreux micro- vacuoles généralement distribuées autour de la périphérie des cellules. Plusieurs des micro- vacuoles sont associés avec des protubérances de mur ou avec le plasmalemme le long des régions. Le hyaloplasme en ces cellules sécrétrices est relativement dense et les mitochondries (figure 15) sont compacts avec une dense matrice (Thomson et al., 1969).

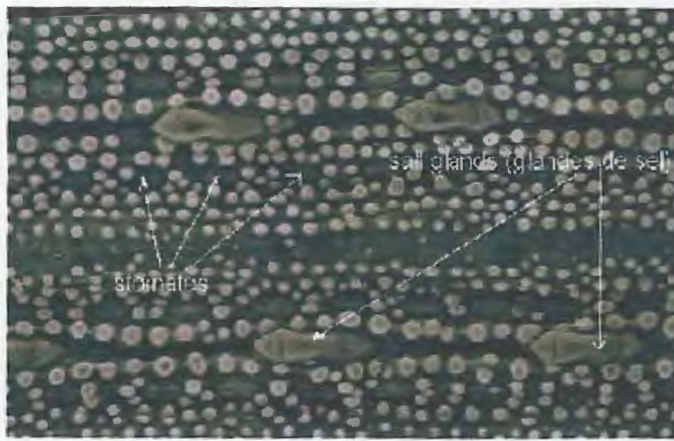


Figure 15: Micrographie électronique (550X) des glandes de sel sur la surface de zoysiagrass. Les glandes sont des les rangées, parallèle aux stomates (Marcum et al., 2003).

La glande saline de commande la teneur en sel des feuilles (Gorham 1987 in: Gorham, 1993) telles que le tamarix (Thomson et al., 1969; Heller et al., 1998), et la spartine (*Spartina alterniflora*), le sel est transporté de l'intérieur de la plante à l'extérieur de la feuille (figure 16) où il ne peut plus être nocif à la plante et qui se cristallise sur la surface des feuilles des plantes qui poussent dans les milieux (Keener-Chavis et al., 2002). Les cristaux prismatiques sécrétés par les glandes épidermiques de sel contiennent principalement les cations Na, K, Ca, et le Cl d'anions, SO₄, carbonate, bien que d'autres ions tel que le magnésium, Si, Sr également aient été détectés (Thomson et al., 1969; Toderich et al., 2002).

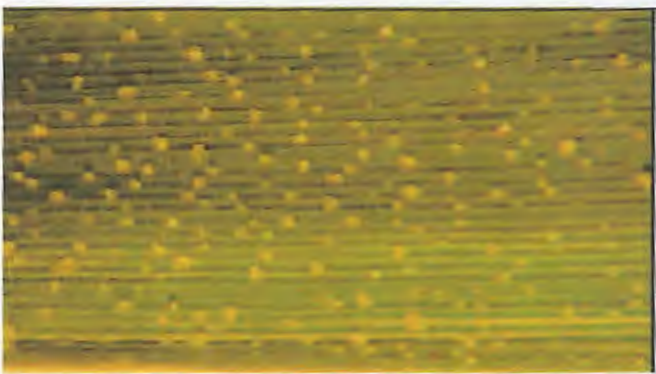


Figure 16: Cristaux de sel sur une feuille de zoysiagrass (Marcum et al., 2003).

Thomson et al. (1969), ont conclue aussi que rubidium s'accumule dans les microvacuoles des glandes et plus tard il sera sécrété par leur fusion avec plasmalemme. Selon Tattini et Gucci (1999), l'activité glandulaire se diffère Chez *Phillyrea latifolia* L., la capacité d'exclusion du Cl⁻ est nettement plus faible que celle du Na⁺, en présence de NaCl externe 300 et 400 mM. L'excrétion du Na⁺ et du Cl⁻ par les trichomes glandulaires est très faible, quelles que soient les concentrations externes en NaCl, et substantiellement plus élevée chez les feuilles basales que chez les feuilles apicales cela indiquent que les mécanismes de tolérance

au sel du *P. latifolia* agissent en excluant le sodium et en maintenant une haute sélectivité pour l'absorption et le transport du K^+ , alors que l'excrétion des ions toxiques est peu significative chez cette espèce.

Les Chénopodes qui comprennent les genres *Atriplex*, *Chenopodium*, *Rhagodia* et *Halimione* ont une couleur gris-vert caractéristique due au développement de vésicules à sel sur les cellules épidermiques. L'épiderme du hydathode (l'appareil de guttation) en dispose d'un géant trichome et des trichomes glandulaires à la surface des jeunes feuilles. En distinguant deux types de trichomes ; non glandulaires et glandulaires, ces derniers, en maturité, pourraient éliminer activement les ions de sel xylémique qui pourraient être précipité en sel des incrustations en dehors des pores de l'eau au voisinage de la surface hydathodes lorsque la solution gutte riche en éléments nutritifs (ions excrétés nutritifs pour les bactérie et les fongiques) s'évapore le jour. (Figure 17. figures 18 a-b chez *Ficus formosana* I. (Moraceae) (Chen et Chen, 2005).

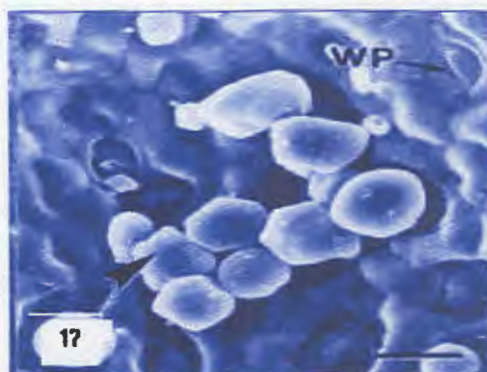


Figure 17: Précipitation et incrustation des sels en dehors de l'eau de pores chez *Ficus formosana* (Chen et Chen, 2005).

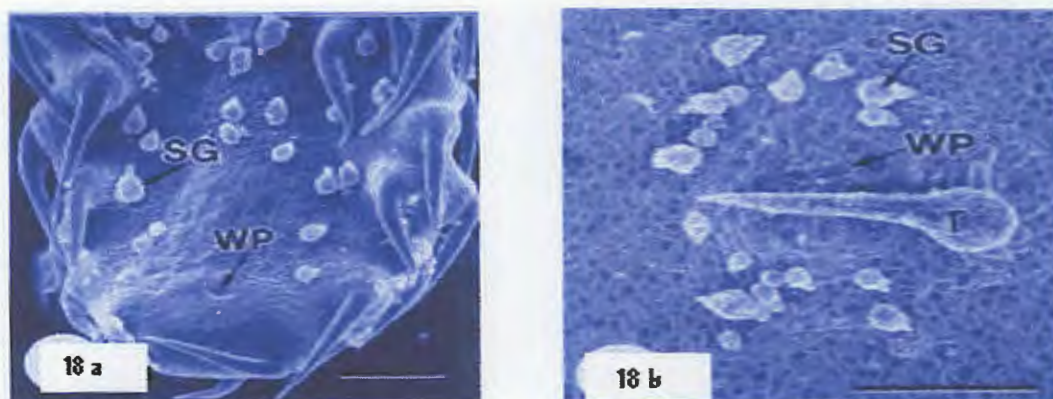


Figure 18: Le trichome géant et trichomes glandulaires chez *Ficus formosana*. T: trichomes, WP: l'eau des pores, SG : sel trichomes glandulaire (les trichomes de sels glandulaires) (Chen et Chen, 2005).

Chez *Atriplex halimus* L., le système des vésicules apparaît particulièrement important au niveau des cellules présentant un cytoplasme dense et situé à proximité du système vasculaire. Le sel absorbé par les racines est transporté vers les feuilles où il s'accumule dans des trichomes dans lesquels il a été accumulé par le transport symplastique par le biais de vésicules de pinocytose et d'exocytose contenant le sel dans le cytoplasme pour être ensuite excrété (Smaoui, 1971 in: Benlaldj, 2007), puis empêchés de rentrer dans la feuille (Gorham, 1993).

Cette accumulation Na^+ et en K^+ augmente avec des concentrations considérables de sels, accompagné d'une teneur en Cl^- contrebalançant l'accumulation des cations (Mozafar et Goodin, 1970).

Les réservoirs souples (salt bladders) peuvent éclater ou s'isoler et se détacher de la feuille, de ce fait réduisant la teneur en sel globale de la feuille. Comparé aux glandes excrétales du sel, les réservoirs souples (trichomes) se sont une réponse limitée à court terme à l'accumulation du sel, et sont principalement efficaces dans la protection des jeunes (Gorham, 1993).

Les réservoirs souples semblent contenir des concentrations élevées d'oxalate libre et comme réservoirs d'eau périphériques assurant la protection à court terme de l'eau contre le stress, contribuant à la succulence et à la tolérance au sel par le maintien et la séquestration d'ions dans l'homéostasie des tissus photosynthétiquement actif de *M. crystallinum*. (Lüttge et al., 1975; Agarie et al., 2007).

En revanche, selon Mozafar et Goodin (1970), le non changement en sa concentration chez *Atriplex halimus* L., l'oxalate contribue à la diminution de la charge positive du trichome qui élimine le sel du reste de la feuille et de prévenir l'accumulation de sels toxiques dans le parenchyme et de tissus vasculaires.

Les ions peuvent aussi être éliminés à la surface des feuilles par lessivage (leaching). C'est un phénomène important dans le bilan minéral des plantes qui ont leur surface perpétuellement mouillée, sous les tropiques ou suite à des arrosages artificiels intensifs par exemple l'eau extérieure est alors en communication avec la solution des ions qui entoure les protoplastes du mésophylle foliaire (espace libre). Vu que l'eau s'écoule continuellement, elle entraîne les ions qui sont parvenus jusqu'à la surface des feuilles, malgré la cuticule et le revêtement cireux (qui ne sont pas totalement imperméables (Richter, 1993) et par lesquels le facteur de la limitation de l'afflux des sels avec le jet de transpiration est une prévention de la perte d'eau (Gorham, 1993). Ces ions sont progressivement lessivés hors de la plante. Ce phénomène est vraisemblablement passif, du type diffusion (Richter, 1993).

3.5.1.2. Détoxification par rejet des tissus et des organes -saturés en sel:

Des plantes isolent Na^+ dans les feuilles inférieures, qui meurent par la suite. En d'autres termes, elle sacrifie les feuilles pour préserver l'entité entière (Cluster, 2006). C'est une mort partielle pour la survie (Batanouny, 1993) (figure 19).



Figure 19: Isolement de Na dans les feuilles (Cluster, 2006).

Pour s'adapter, les plantes rosettes rejettent les feuilles plus anciennes une fois devenues surchargées avec du sel et compte sur les plus jeunes feuilles pour l'assimilation photosynthétique. De telles plantes produisent constamment les nouvelles feuilles. Pendant que les feuilles mûrissent leur rôle change en celui des dépôts de sel. Il serait avantageux que de telles plantes soient efficaces à réutiliser leur potassium de vieux à de jeunes feuilles (Gorham, 1987 ; in Gorham, 1993).

Dans le cas des chénopodes, quelques branches sont jetées. En outre, le cortex charnu est enlevé des tiges de vieilles branches. Ceci se produit en raison de la formation de phellogène profondément dans le cortex et les couches produites de liège poussent le cortex charnu qui est finalement jeté. Les tissus de ce cortex succulent avec les cellules charnues accumulent des quantités considérables de sels durant leur vie. Plus la plante est vieille, plus la sève des tissus corticaux sera concentrée. C'est une forme d'élimination des sels non désirés par la plante (Batanouny, 1993).

3.5.1.3. Détoxification par l'élimination des sels par les racines :

La régulation de l'entrée initiale de Na^+ dans les cellules corticales des racines est importante pour la tolérance des plantes à la salinité. La vitesse d'influx de Na^+ chez les halophytes est beaucoup plus inférieure que celle chez les non halophytes (Jabnour, 2008). Les racines de beaucoup d'espèces rejettent le sel apparemment au moyen de la membrane semi-perméable et empêchent la pénétration des ions. Ce n'est pas un transport actif qui est impliqué, comme c'est le cas dans les glandes au niveau des feuilles, car ni le refroidissement ni les inhibiteurs métabolique ne diminue l'exclusion au niveau des racines

(Ricklefs et Miller, 2005). L'excrétion pourrait être réalisée chez certains glycophytes par des $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ATP-ases dépendante (Heller, 1998).

3.5.1.4. Le contrôle par la réduction de la croissance:

La réduction de la croissance est une capacité adaptative nécessaire à la survie d'une plante exposée à un stress abiotique (Zhu, 2001). Les halophytes, peuvent passer à l'état de vie ralentie au moment où la salinité est plus fortes (Simonneau et Aubert, 1963). En effet, le retard de développement permet à la plante d'accumuler de l'énergie et des ressources pour combattre le stress avant que le déséquilibre entre l'intérieur et l'extérieur de l'organisme n'augmente jusqu'à un seuil où les dommages sont irréversibles. Pour illustrer cette tendance, dans la nature, la croissance est inversement corrélée à la résistance au stress salin d'une espèce/variété (Zhu 2001). D'autre part des glycophytes; le blé tendre, limite la diminution de sa surface foliaire, au risque de subir des problèmes hydriques, semble mieux préserver ses potentialités photo-synthétiques et sa productivité en grain (Alem et al., 2002). La dynamique de la croissance et de développement propre à un génotype constitue un facteur important dans la tolérance au sel. En effet, une plante peut être relativement insensible au sel si la durée de vie des feuilles est inférieure au temps qu'il faut pour que les feuilles envahies par le sel atteignent le stade final de la nécrose (Levigneron et al., 1995).

3.5.1.5. Adaptation tissulaire par la succulence :

La succulence est le stockage de réserves d'eau dans les tissus végétaux (feuilles, tiges et troncs) tels que les Cactées, Crassulacées et Euphorbiacées adaptées à une forte concentration des sels colonisent les sebkhas ou le bord des déserts côtiers (Benkheira et al., 2007) (figure 20, 21). Le haut contenu d'eaux par secteur de feuille indique le caractère Succulent des espèces comme *Lepidium crassifolium* et est impliqué dans l'action d'éviter les hautes Concentrations de sel de (Na^+) dans l'habitat le plus salin (Mile et al 2002). La sève des succulents xéromorphes contient plus les acides organiques que la sève des succulents des mésomorphes qui contient plus des ions inorganique (Batnouny, 1993).



Figure 20: *Euphorbia* (Benkheira et al., 2007).

Figure 21: *Cucurbita foetidissima* (racine xérophytique succulente): Racine découpée pour montre les tissus succulents (Dimmitt, 2003).

3.5.2. Aspect physiologique, biochimique et génétique :

Les mécanismes physiologiques et moléculaires de la tolérance aux composants osmotiques et ioniques du stress salin se passe au niveau cellulaire, à l'organe, et au niveau de plantes entières (Munns et Tester, 2008).

Les réponses biochimiques incluent la biosynthèse et la fonction d'osmolytes, la commande du flux de l'eau, et le transport des ions membranaire pour l'entretien et le rétablissement de l'homéostasie. (Zhu, 2001).

3.5.2.1. La tolérance sur le plan physio- biochimique :

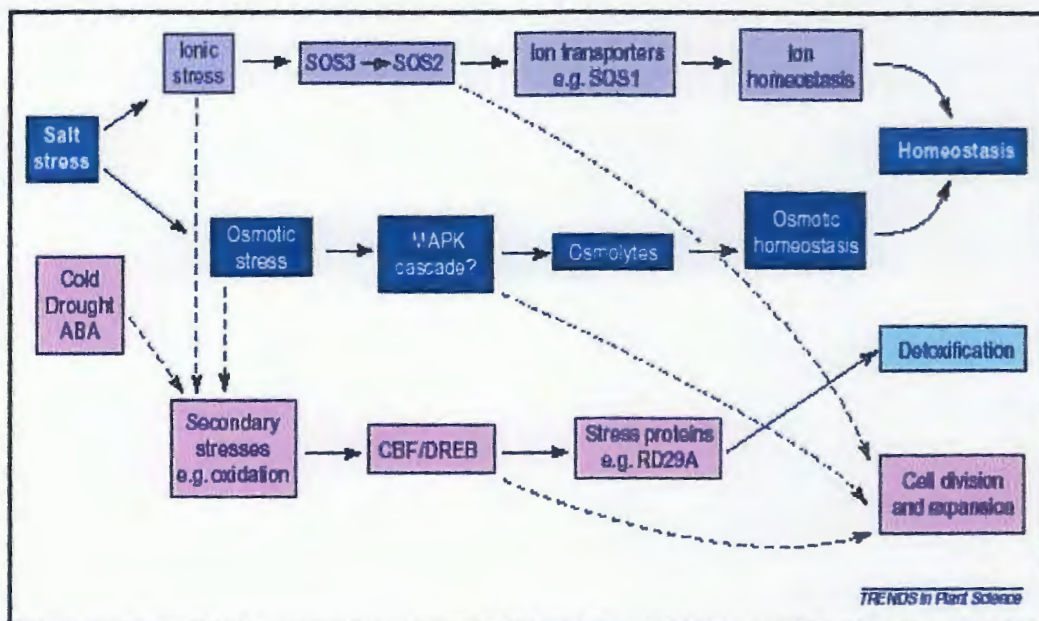


Figure 22: les trois aspects de la tolérance au sel dans les végétaux (homéostasie, détoxification et l'influence de la croissance) et les liens qui les interconnectent (Zhu, 2001).

Les trois aspects de la tolérance au sel dans les plantes (homéostasie, la désintoxication et la croissance) ainsi que le parcours Interconnexion; homéostasie est décomposé en homéostasie ionique et osmotique. Le parcours de médiateur ionique SOS Homéostasie Na⁺ et de tolérance. Les deux principaux soulignent, soulignent osmotique et ionique, causent des dommages secondaires ou contraintes, telles que l'oxydation. Des protéines de stress type LEA sont proposés en fonction de la désintoxication ou l'atténuation des dommages. FBC / DREB arbitrer certains facteurs de transcription de l'expression des gènes de protéines de stress en réponse aux stress secondaire causé par une forte concentration de sel, le froid, la sécheresse ou à l'acide abscissique (ABA). Le Parcours de l'homéostasie ionique et de l'homéostasie osmotique et de désintoxication, est proposé pour nourrir activement dans la division cellulaire et de l'expansion de règlement pour contrôler la croissance des plantes (Figure22).

-Compartmentation intracellulaire et synthèse des « Osmoprotectants » : Adaptation cellulaire :

Le moyen le plus direct à maintenir de faibles concentrations cytoplasmique du Na⁺ est le stockage de ce dernier dans des vacuoles au sein de chaque cellule. Pour maintenir l'égalité de potentiel osmotique, la plante doit accumuler des solutés dans le cytoplasme et dont ils ne portent pas atteinte à la biochimie cellulaire. La compartimentation intracellulaire peut également être associé à la succulence et à fournir un plus grand volume de vacuole dans laquelle la Na⁺ peut être stocké (Tester et Davenport, 2003).

-Régulation de l'homéostasie ionique :

Les plantes doivent garder des concentrations en ions toxiques basses pour accumuler les ions essentiels. Elles utilisent le transport primaire et le transport secondaire à travers les canaux de transport du Ca⁺², pour maintenir caractéristiquement une concentration élevée de K⁺ et celle du Na⁺ plus basse dans le cytosol (Zhu, 2003).

La capacité des cellules des plantes de maintenir de basses concentrations cytosoliques en sodium est un processus essentiel lié à la capacité des plantes de se développer dans des concentrations élevées en sel (Maathuis et Amtmann, 1999; Bulmlald, 2000). La prise ou l'exclusion du sel suivi du transport et de compartimentage est l'une plus des importantes caractéristiques de la tolérance (Winicov, 1989).

La tolérance n'est pas seulement l'adaptation à la toxicité de Na⁺, mais l'acquisition de K⁺ et le bon transport est un déterminant important de la tolérance (Rodreguez-Navarro, 2000 in : Seaman, sd).

-Le contrôle génétique de l'homéostasie ionique :

L'homéostasie est garantie par différents processus, toute une série de gènes sont particulièrement activés, codant pour des protéines responsables du maintien de l'homéostasie. Ce sont les gènes SOS (Salt Overly sensitive). La protéine SOS3 interagit avec SOS2, qui est une sérine/thréonine protéine kinase. La cible du complexe SOS3/SOS2 est la protéine SOS1, un transporteur membranaire Na^+/H^+ (antiport voir figure 25), qui exporte les ions sodium hors de la cellule. L'expression des gènes SOS est régulée par la présence de sel chez *A. thaliana* et la régulation de l'homéostasie en présence de sel est réduite par les mutations de SOS2 et SOS3 (Serrano et Rodriguez-Navarro, 2001; Calu, 2006).

La voie de SOS fonctionne dans l'homéostasie d'ion sous le stress salin. Les concentrations extracellulaires élevées du sel, marquent une élévation des concentrations de Ca^{2+} cytosoliques. La sonde SOS3 et active de Ca^{2+} sur la perception de ce signal de Ca^{2+} agit l'un sur l'autre avec la protéine kinase SOS2. SOS2 activé régleme alors les activités des transporteurs d'ion ou des activateurs transcripteurs pour régler l'homéostasie d'ion ou l'expression de gène. Les cibles SOS2 incluent l'antiports SOS1 de Na^+/H^+ , le échangeurs vacuolaire NHX de Na^+/H^+ , et le transporteur HKT1 de Na^+ . D'autres cibles potentielles incluent l'atpase de tonoplaste et pyrophosphatases, voies d'eau, et transporteurs de potassium (figure 23) (Xiong et Zhu, 2002).

- Les canaux ioniques sont des acteurs clés dans le maintien de cette l'homéostasie ionique également en cours de la salinité (Xiong et Zhu, 2002 ; Diédhiou, 2006).

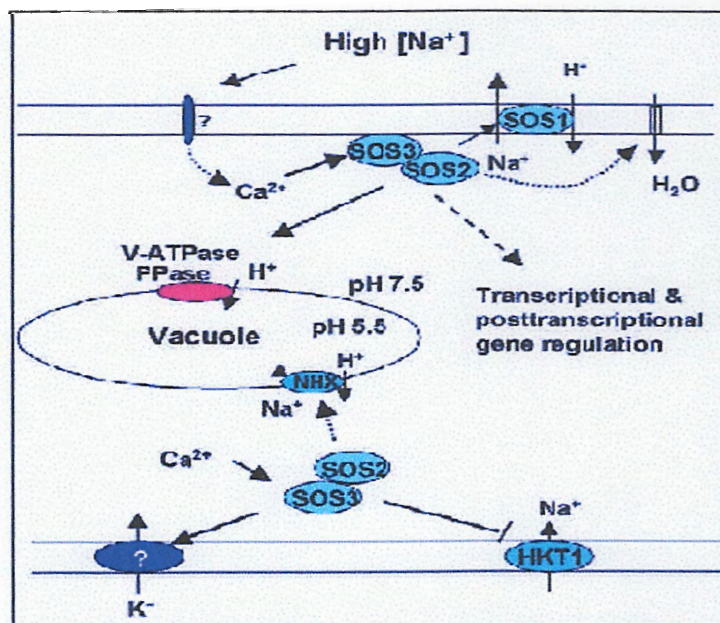


Figure 23: Fonction de la voie SOS en homéostasie ionique sous stress salin (Xiong et Zhu, 2002 ; Diédhiou, 2006.).

- L'exclusion et la compartimentation de Na^+ : échange vacuolaire.

A l'échelle de la cellule, Les ions excédentaires sont éliminés par un processus largement répandu chez les végétaux, c'est leur transfert dans les vacuoles où ils seront précipité en sels difficilement solubles, par exemple, la mise hors circuit du calcium se fait sous forme de cristaux d'oxalate de calcium ou, plus rarement en tant que carbonates. En outre, lors des pluies, les sels qui ont traversé les parois des cellules épidermiques et cuticules par la transpiration, seront lessivés (Nultsch, 1996).

Le rôle du compartimentage intracellulaire de Na^+ dans la tolérance des plante en sel a été démonté par le clonage des antiports Na^+/H^+ vacuolaires (Bulmlald, 2000). C'est ces antiports Na^+/H^+ qui négocient la prise de Na^+ dans des vacuoles, conduite par le gradient vacuolaire de proton établi par l'ATP-ase vacuolaire de proton (de V-type) qui acidifie le lumen vacuolaire. La séquestration Na^+ vacuolaire en résultant protège des réactions enzymatiques essentielles dans le cytoplasme contre les niveaux Na^+ excessifs le maintien de la turgescence. (Glenn et autres, 1999 in : Horie et Schroeder., 2004).

Les ions impliqués dans l'ajustement osmotique sont circonscrits à la vacuole tandis que le potentiel osmotique est ajusté dans le cytoplasme par les solutés organiques. Les ions toxiques Na^+ et Cl^- semblent exclus des sites de la cellule dans la vacuole qui présente 90 % du volume cellulaire, et où ils sont utilisés comme osmoticums. Cette accumulation des ions permet d'ajuster le potentiel de la vacuole et de détoxifier le cytoplasme des ions et d'éviter l'accumulation dans la cellule mur qui pourrait causer la déshydratation (figure: 24) (Levigneron et al., 1995).

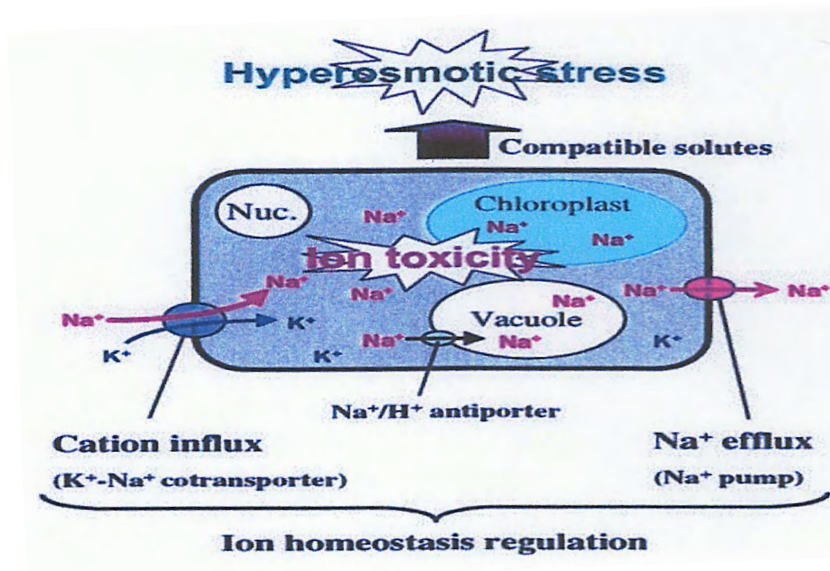


Figure 24: Stratégies de l'amélioration de la tolérance des cellules à la salinité (Yoshida, 2002).

Pour améliorer la tolérance de sel des plantes, au moins deux approches devraient être utilisées. D'abord, une augmentation de la biosynthèse des corps dissous compatibles se protégerait les molécules cellulaires et ajustent la pression de turgescence des cellules contre le stress hyperosmotique. En second lieu, le perfectionnement de l'activité des antiports de Na /H (figure : 25) dans la membrane et les membranes plasmiques vacuolaires de la maintenance de l'homéostasie cytosolique de Na contre le stress ionique (Nakayama et al, 2005).

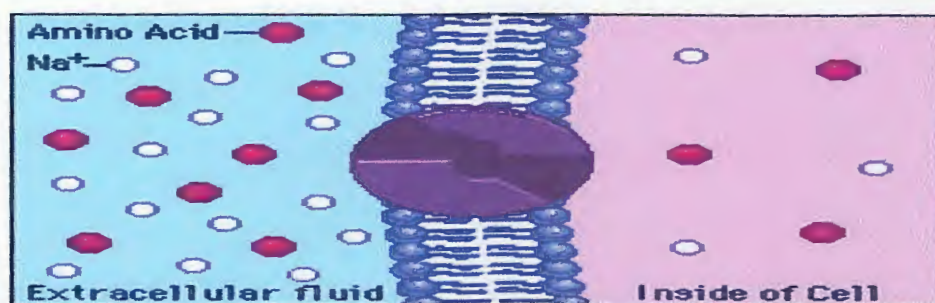


Figure 25: Fonction des antiports de sodium (Cluster, 2006).

-L'osmorégulation et le maintien de l'homéostasie osmotique (potentiel osmotique) :

En milieu salin, la plante rencontre la difficulté d'assurer son apport en eau. Pour cela, il faut qu'elle puisse ajuster la pression osmotique de ses tissus par rapport à la pression osmotique du sol par l'épictèse, qui permet à la plante d'assurer une hypertonie constante accrue en présence de certaine quantité de sel.

Les halophytes présentent ce haut pouvoir, renforcé par l'absorption de sel et sa conduite vers les feuilles, contrairement aux glycophytes (Heller et al., 1998; Calu, 2006).

Les halophytes, dont la tolérance protoplasmique aux sels est très élevée, sont particulièrement bien adaptées. Elles peuvent régulariser la pression osmotique et utiliser l'humidité aérienne (*Cressa cuetica*, *Mesenzbryantltemum*, *Tamarix* etc.). Leurs tissus présentent une pression osmotique très élevée (potentiel osmotique très bas) pouvant dépasser 100 bar (10 MPa), (voir tableau 10) due pour l'essentiel à du NaCl 10g/l de Na Cl développent environ 7bar), et accessoirement à des composés organiques. La succion des tissus est donc considérable, et voisine de celle des xérophytes ; mais pour ces derniers, elle est acquise soit par une très faible teneur des tissus en eau (sclérophytes), soit par des mucilages (plantes grasses) (Heller et al., 1998).

L'osmorégulation (ajustement osmotique) est facilitée par la réduction accélérée du sodium et du chlore vers les feuilles, les glycophytes, au contraire, retiennent Na, et à moindre degré Cl, dans leurs racines ; la migration de K s'en trouve accrue, mais cela ne suffit pas à rétablir la pression osmotique foliaire.

Tableau 10 : Pressions osmotiques moyennes des cellules de quelques espèces halophyles ou non halophyles (Mazliak et Laval- Martin 1995).

Espèces	Pression osmotique (atm).
Plantes halophyles	
<i>Salicornia europaea</i>	39,7
<i>Spartina patens</i>	20,9
<i>Triglochin maritima</i>	24,6
<i>Glaux maritima</i>	14,6
Plantes non halophyles	
<i>Caladium sp</i>	08
<i>Rhoeo sp</i>	12
Betterave	21

Toutefois, une pression osmotique très élevée dans la vacuole crée une succion sur le cytosol, puis une déshydratation pourrait compromettre le fonctionnement du métabolisme en désorganisant la structure tertiaire des protéines, ainsi leur perte d'activité. Le problème sera résolu en élevant leurs pressions osmotiques interne (Mazliak et Laval-Martin 1995). Les halophytes (mais aussi occasionnellement des glycophytes) sont capables de lutter contre ce phénomène en produisant des composés dits osmoprotecteurs (ou solutés compatibles) (Figure 26) (Levigneron et al., 1995; Yoshida, 2002, Calu, 2006) qui sont les même rencontrés au stress hydrique (Heller et al., 1998) pour conforter la perte de l'eau dans l'environnement qui présente une pression osmotique plus grande que leurs corps en produisant de molécule particulières qui sont des acide aminés, certaines polyoles et certains dérivés ammoniaqués (figure 27), qui se rencontre dans le cytoplasme en haute concentration et augmente sa pression osmotique, mais qui n'ont pas d'effets dommageable sur le systèmes enzymatique de la cellule. Au mangrove, pour contourner le problème de l'acquisition difficile de l'eau, beaucoup de plantes contiennent de très hauts taux de composés osmoprotectants dans les racines et les feuilles (Ricklefs et. Miller, 2005).

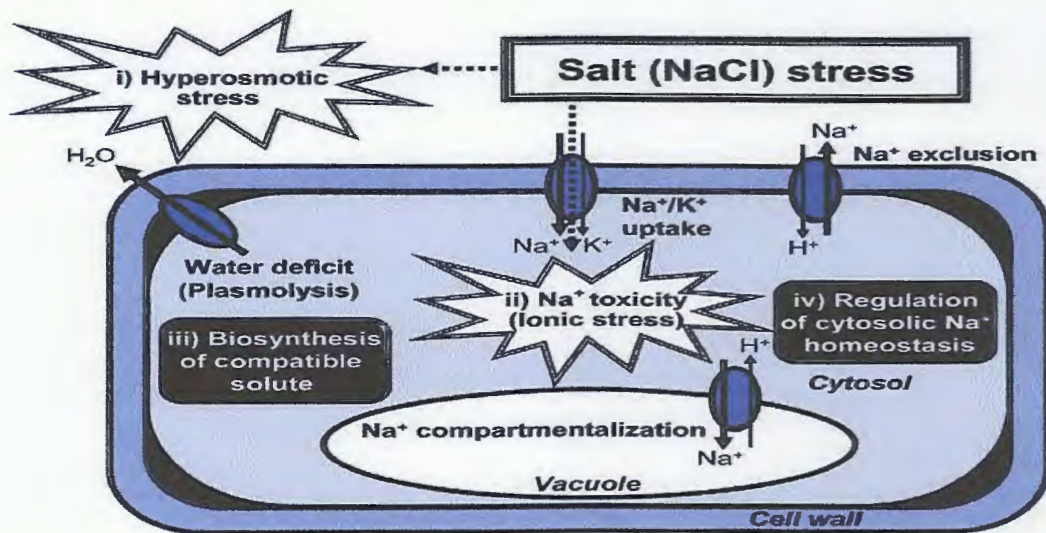


Figure 26: Les voies d'osmorégulation.

Pour améliorer la tolérance de sel des plantes, au moins deux approches devraient être utilisées. D'abord, une augmentation de la biosynthèse des corps dissous compatibles se protégerait les molécules cellulaires et ajustent la pression de turgescence des cellules contre l'effort hyperosmotique. En second lieu, le perfectionnement de l'activité des antiports (Na/H) de Na dans la membrane et les membranes plasmiques vacuolaires de la maintenance de l'homéostasie cytosolique de Na contre le stress ionique (Nakayama et al, 2005).

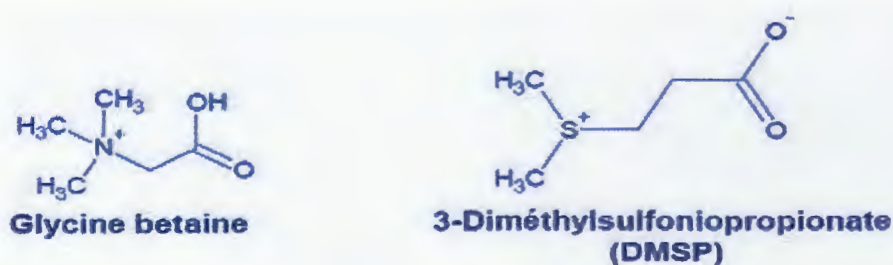


Figure 27: La Glycine bétaine et 3-Diméthylsulfoniopropionate (DMSP) (Heller et al., 1998).

Gorham, et al (2005), rapportent des changements de la composition de corps dissous de feuille d'un certain nombre de Triticeae éternel en réponse à la salinité. Il y avait variation à l'intérieur et entre des espèces dans l'ampleur de l'accumulation de Na et de Cl dans les feuilles.

Selon Heller et al. (1998), ces composés s'accumulent dans le cytosol; ainsi des cellules en culture de la Graminée halophyte *Distichlis spicata* sous 200mM de NaCl présentent une concentration en proline de 28mM, mais de 230 Mm dans le cytosol. Leur rôle est double : par leur concentration ils assurent l'ajustement osmotique entre le cytosol et la

vacuole ; par leur structure chimique qui contient des fonctions polyalcool, aminoacide, ammonium quaternaire ou sulfonium tertiaire, ils manifestent des affinités pour les groupements carbonés des protéines, protégeant ainsi leur intégrité structurale.

L'intensification du métabolisme de la choline en cas de stress salin de la peut participer au maintien des flux membranaires, grâce à un renouvellement plus intense de la choline phosphorylée qui est la composante majeure de la structure des membranes. L'augmentation de la proline est consécutive à la stimulation de sa synthèse, résultant d'une élévation des quantités de message codant pour l'enzyme qui convertit le glutamate semi aldéhyde en proline. (Levigneron et al., 1995). En outre La MAPK (Mitogen-Activated Protein Kinase) est suggérée comme à l'origine de la régulation de la réponse au stress osmotique par l'implication d'osmorégulateurs (Calu, 2006).

3.5.2.2. Contrôle et réparation des dégâts provoqués par le stress salin qui induisent des protéines:

Suite à l'activation des facteurs de transcription, certains gènes vont être régulés afin de rétablir l'homéostasie cellulaire et contribuer ainsi à la résistance ou à l'adaptation de la cellule à un stress donné. Ces gènes codent généralement des enzymes impliqués dans la production de molécules osmorégulatrices, des transporteurs, des enzymes de détoxification, des chaperones (LEA (Late Embryogenesis Abundant), HSP (Heat-Shock Proteins)) (Zhu, 2001; Jabnourne, 2008).

3.5.2.3. Gestion du stress oxydatif :

Augmentation de l'activité des enzymes antioxydantes a amélioré la tolérance à la salinité (Jabnourne, 2008).

Les antioxydants:

- Enzymes: catalase, superoxyde dismutase, ascorbate peroxydase, glutathione réductase
- Molécules non enzymatiques: Ascorbate, le glutathion, le tocophérol, les caroténoïdes, les anthocyanines.

3.5.2.4. La stratégie d'adaptation physiologique de l'excrétion foliaire

Selon Jabnourne (2008), la stratégie d'adaptation physiologique de l'excrétion foliaire est de:

- Pomper le sel dans un petit volume de l'appoplaste;
- Isoler cet espace du reste de l'appoplaste foliaire;
- Création d'un gradient Ψ (potentiel) osmotique (Entrée d' H_2O),

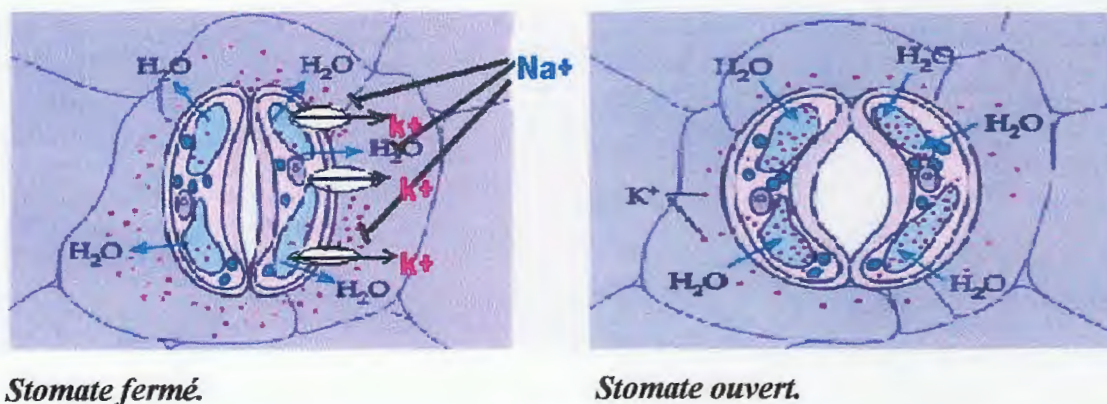
- Augmenter la pression et créer une force de pression : Flux forcé à travers les structures les plus fragiles entre l'apoplaste et la surface foliaire.

3-5-3-Contrôle de la transpiration :

Pour assurer la nutrition hydrique dans un gradient électrochimique défavorable, à l'échelle cellulaire les plantes font diminuer l'évapotranspiration par des adaptations anatomiques (ex. réduction des feuilles à petites écailles) ou physiologiques (ex. régulation du flux hydrique à travers les stomates) (Gobot et al., 2003), tels que les plantes de mangrove limitent leur charge en sel en diminuant la transpiration d'eau au départ de leurs feuilles (Ricklefs et. Miller, 2005).

Lors du contrôle de la transpiration, les halophytes transportent des sels (essentiellement) via le courant de transpiration, régulent la transpiration, ferment ou ouvrent les stomates et contrôlent l'accumulation des sels dans les parties aériennes (figure 28).

Chez les Glycophytes: $[Na^+]$ cytoplasme augmente, les cellules de garde répondent moins bien à l'ABA, CO_2 et l'obscurité et les stomates restent ouverts, ce phénomène est observé chez les plants qui sont dépourvues de système d'excrétion de sel sur la surface foliaire. Cependant c'est la réaction contrastée entre halophyte et glycophyte, car le fermeture des stomate détermine l'adaptation des plantes sous stress salin (Robinson et al., 1997; Thiel et Blatt, 1991 selon Jabnoute 2008).



Stomate fermé.

Stomate ouvert.

Figure 28: Contrôle de la transpiration chez les végétaux (Jabnoute, 2008).

3.5.4. Adaptation des plantes par les voies photosynthétiques :

Il semble que la salinité est un facteur d'importance secondaire en ce qui concerne la différenciation dans différents chemins (méthodes) photosynthétiques. Généralement on ne peut pas déclarer que les espèces C4 ont un avantage de choix dans les habitats extrêmes. Les plantes avec la voie C4 sont en activité à un moment où ceux avec la voie C3 ne sont pas dans

des conditions optimales pour leur activité. Cependant la saison fleurissante ne montre aucune relation avec la voie photosynthétique ; rencontré chez les chénopodes pérennes succulents ayant ces deux voies, ces plantes fleurissent en fin d'été et en même temps en automne (Batanouny, 1993).

3.5.5. Le trajet générale du sel dans la plante selon l'inclusion et l'exclusion :

A l'échelle de la plante entière, les ions chlorure et sodium entrent dans les plantes par les racines et sont véhiculés par le xylème jusqu'aux tiges et aux feuilles. Là, ils sont soit stockés (plantes de type incluser), soit peu retenus et révéhiculé par le phloème jusqu'aux racines (plantes de type excluser) (Levigneron et al., 1995; Berthomieu et al., 2003).

Il semble que les ions NaCl pénètre dans les cellules de la racine, puis circulent à travers le cortex racinaire jusqu'au stèle (voie symplasmique) (voir figure 29) où ils sont sécrétés dans le xylème comme les autres ions minéraux. A l'échelle de la cellule le Cl^- et le Na^+ entre par des transporteurs spécifiques. Pour éviter la saturation de l'espace intercellulaire (appoplasme) des partie aériennes et la déshydratation rapide des cellules (Levigneron et al., 1995).

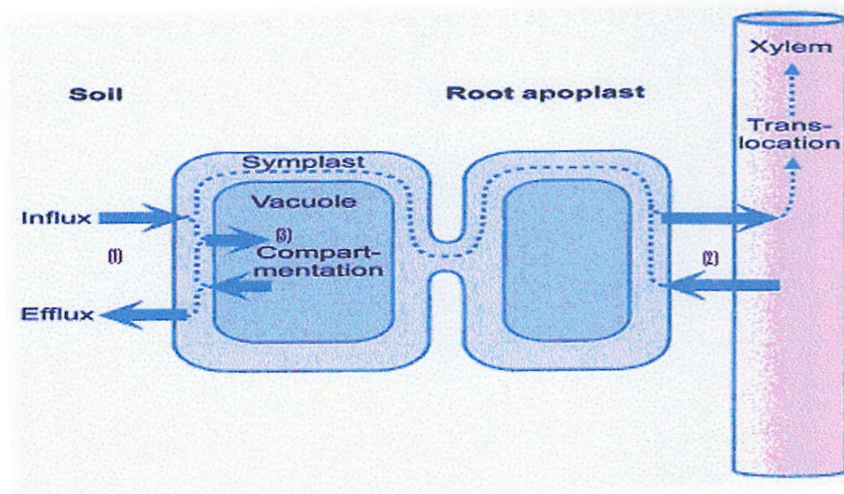


Figure 29: Les principaux processus qui contribuent à l'établissement des rapports cytoplasmiques de K^+/Na^+ dans les plantes: (1) influx et flux à la frontière de racine /sol ; (2) translocation entre la racine et la pousse ; (3) compartimentage par exemple dans la vacuole (Maathuis and Amtmann, 1999).

L'inclusion: la plante (plante incluser) capte le sel, qui parvient aux feuilles, au même titre que l'eau, par le mouvement ascendant de la sève dans les vaisseaux. A l'intérieur des cellules (des parties aériennes), le sel est alors stocké dans les vacuoles grâce à des systèmes de "pompes" moléculaires. Et il est ainsi isolé des constituants cellulaires vitaux.

L'exclusion: (type excluder) : le sel véhiculé, faute d'y être piégé, est réexporté vers le xylème. Dans ce cas, ce sont les cellules racinaires qui assurent la protection des parties aériennes, en limitant la quantité des sels sodium transportés par le xylème et/ou en l'excrétant dans le milieu extérieur (Levigneron et al., 1995, Berthomieu et al., 2003). Lorsque la plante empêche le sel de remonter jusqu'aux feuilles c'est grâce à la première barrière qui existe au niveau de l'endoderme, couche interne de cellules de la racine. Cependant, cette barrière peut être interrompue, en particulier lors de l'émergence des ramifications de la racine. D'autres mécanismes limitent le passage de sel des racines vers les feuilles mais les gènes qui les gouvernent sont encore largement inconnus (Berthomieu et al., 2003). Donc la tolérance est de réduire l'accumulation de Na^+ dans les feuilles par l'élimination sur le xylème et le rechargement de Na^+ dans la sève du phloème (Rodríguez-Navarro et Rubio, 2006) avant qu'il atteigne le système foliaire et pour maintenir l'activité de la photosynthèse ainsi que l'émergence et la croissance des nouvelles feuilles (Jabnour, 2008).

3.5.6. Découverte génétique :

Les travaux des chercheurs de Montpellier mettent à jour un nouveau type de mécanisme de résistance au sel, intermédiaire entre les stratégies d'exclusion et d'inclusion : le sel parvient jusqu'aux feuilles, mais il est aussitôt "re-pompé" et reconduit par les vaisseaux vers les racines, qui peuvent le ré-excréter à l'extérieur. Une étude de la fonction de ce gène d'*Arabidopsis* a été réalisée. Il s'agit d'un gène codant pour un transporteur de sodium, qui s'exprime seulement le phloème. Lorsque ce gène est muté, il ne produit plus normalement le transporteur et on peut observer une accumulation de sodium dans les feuilles et une diminution dans les racines. La plante mutante est beaucoup plus sensible au sel que la plante normale et meurt rapidement en cas de stress salin. A l'inverse, il est raisonnable de penser que l'on pourra renforcer la résistance de la plante au sel en augmentant l'expression de ce gène. Le mécanisme mis à jour ici offre de nouvelles perspectives. Les résultats obtenus indiquent que, chez *Arabidopsis*, la modification d'un seul gène affecte fortement la résistance de la plante au sel. Ce gène présente des ressemblances avec un gène de blé codant pour un transporteur sodium -potassium, ce qui laisse présager une application pour les plantes cultivées (Berthomieu et al, 2003).

Chapitre 04

Amélioration des sols salins

4.1. Introduction :

Pour une mise en valeur des sols et l'irrigation avec des eaux salines, plusieurs approches et pratiques ont montré qu'il n'existe pas une seule méthode de contrôle de la salinité mais il est possible d'adopter des techniques adéquates pour de telles situations, cela à une bonne gestion de l'eau d'irrigation, le lessivage et le drainage des sels dans la zone racinaire des plantes, des techniques culturales adaptées, le choix d'espèces ou de variétés tolérantes au sel et qui devraient permettre une production satisfaisante pour l'agriculteur. Il sera de plus important de connaître les relations entre la disponibilité d'eau, la salinité de l'eau, la nature du sol, la salinité et la dégradation du sol et les prétentions des plantes afin de prendre des mesures efficaces pour la protection de la végétation et d'éviter la salinisation du sol.

Afin d'obtenir un système de gestion satisfaisant, il faut combiner de manière appropriée les facteurs économique, climatique, social, édaphique et hydrogéologique de la zone concernée.

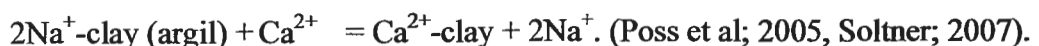
Evidemment, c'est la FAO la plus concerné parmi d'autres auteurs de cette gestion pour l'intérêt de la agriculture et d'alimentation.

4.2. Les solutions par méthodes chimiques:

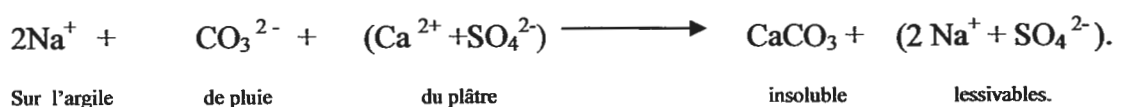
4.2.1. Amendement :

a)- Pour les sols dont la structure n'est pas encore complètement modifiée par la salinité et la présence de Na^+ :

- Amendements de gypse (CaSO_4) permettant de fixer du Ca^{2+} sur la CEC et de lessiver le Na en profondeur. L'amélioration des sols salins sodiques a besoin d'une source de calcium qui peut remplacer l'excès en sodium échangeable. Une diminution de la teneur en sodium selon la réaction :



Le CaSO_4 (ou le gypse), faiblement soluble dans la solution du sol, apporte des ions sur le complexe argilo- humique.



Le complexe argilo humique se recharge ainsi en Ca^{2+} tandis que le pH diminue :



Pourquoi le sulfate de calcium CaSO_4 est préféré à l'amendement calcaire : c'est une question de force de base : dans un amendement calcique basique tel que, CaO , CaCO_3 , ou $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sont associés à Ca^{2+} des bases fortes CO_3^{2-} , OH^- , O^- . (rappelant que Ca^{2+} n'est pas une base mais un cation d'alcalinité négligeable, ces bases fortes agissent sur le pH en le faisant remonter, par contre dans CaSO_4 , Ca^{2+} est associé à une base faible SO_4^{2-} ou HSO_4^- , pratiquent sans action sur le pH. C'est donc l'amendement qui convient, il apporte le calcium sans augmenter le pH, et au contraire en le faisant plutôt diminuer (Soltner, 2007).

b)- Pour les Solonetz:

La seule technique à mettre en oeuvre est un labour profond ou sous-solage de manière à casser les structures massives à croûte de sel. L'amendement de CaSO_4 peut ensuite être réalisé par la suite (du labour) pour restaurer la fertilité chimique (Echevarea, sd). Cette dernière peut être appliquée aussi par apport du soufre ou du pyrite si le sol est très calcaire (Guet, 2003).

Abrol et al (1988), a démontré l'efficacité de l'utilisation du gypse selon des résultats obtenus sur un sol salin. (Figure: 30).

Pour remédier aux effets néfastes du sodium et permettre aux végétaux de retrouver un parfait équilibre nutritionnel, il faut incorporer aux sols des engrais potassiques, à la fin de l'hiver (Badot et Crini, 2007).

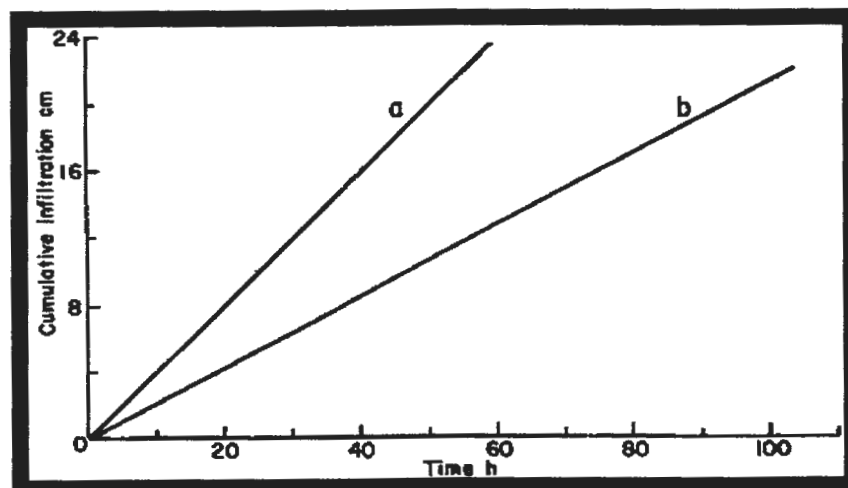


Figure 30 : effet de l'application de gypse sur l'infiltration cumulative dans un sol salin. a - avec, b - sans gypse (Abrol et al., 1988).

Une autre option est l'utilisation d'acide sulfurique quand le sol contient de la calcite. Le principe est de dissoudre le CaCO_3 pour libérer le calcium in situ (Majerus, 1996). Selon Badraoui et al. (2002), le générateur d'acide sulfurique est une méthode pratique pour traiter l'eau d'irrigation. En effet, la salinité a diminué après chaque semaine d'irrigation avec l'eau traitée (Figure 31, 32) expérimentée au Maroc.

Une diminution importante de l'ESP après une seule semaine d'irrigation avec l'eau traitée. En surface, le SAR a continuellement diminué après chaque semaine d'irrigation avec l'eau traitée.

L'irrigation avec une eau traitée légèrement acide n'a pas eu d'effet très significatif sur le pH du sol.

L'enrichissement continu de la solution du sol par les ions Ca^{++} résultant de la solubilisation du calcaire existant dans le sol a amélioré considérablement la perméabilité du sol. La variabilité spatiale de l'humidité, sous l'irrigation à goutte à goutte, montre que seulement la partie située sous les goutteurs est réhabilitée.



Figure 31: Irrigation gravitaire avec l'eau traitée (Badraoui et al., 2002).



Figure 32: Effet du traitement de l'eau d'irrigation sur le développement végétatif du maïs: irrigué avec l'eau traitée (à droite) ou non traitée (à gauche).

4.3. Méthodes physiques et mécaniques :

Pour la correction des sols salins Guet (2003), propose la décompaction en premier lieu afin d'améliorer le taux d'infiltration des eaux de pluie et l'efficacité des irrigations de lessivage, alors que toutes les pratiques agricoles visent à réduire le compactage et améliorer la structure du sol.

Éraflure : Enlever les sels qui se sont accumulés sur la surface de sol par des moyens mécaniques a eu seulement un succès limité (figure 33) bien que beaucoup de fermiers aient recouru à ce procédé. Bien que cette méthode pourrait temporairement améliorer la croissance de récolte, la disposition finale des sels pose toujours un problème majeur (Abrol et al., 1988).

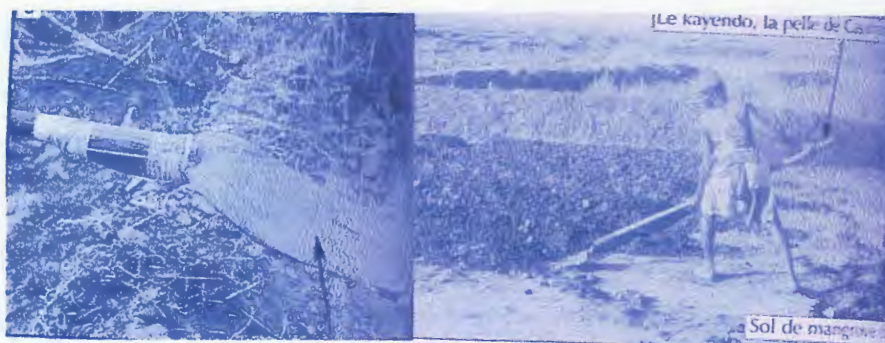


Figure 33: Le kayendo: Curieuse pelle en bois renforcée d'un simple tranchant d'acier, ne retourne le sol que sur quelque centimètres, évitant de remonter le sel (Cheverry in Soltner, 2007).

- **Rinçage** : Enlever les sels accumulés en extérieurs en rinçant l'eau au-dessus de la surface est parfois employé pour déssaliniser des sols ayant les croûtes extérieures de sel. Puisque la quantité de sels qui peuvent être rincés d'un sol est plutôt petite, cette méthode n'a pas beaucoup de signification pratique (Abrol et al., 1988).
- **Raclage** : Le sous-solage: il demeure le seul remède efficace à la compaction du sol mais il faut savoir qu'il n'a pas d'effet à long terme sur la structure de sol. Il est employé soit pour avoir une action radicale de compaction ou pour détruire la semelle de labour qui s'est formées sur plusieurs années de travail conventionnel dans un même champ (Guyennon, 2006).
- **Nivellement**: le nivellement des terrains améliore la répartition de l'eau et permet une infiltration uniforme, le planage change la pente naturelle en surface plane. Cette opération entraîne un certain compactage du sol d'où l'importance d'un sous-solage pour briser la compacité (Kenfaoui, 1997).
- **Travail de sol léger**: Le travail de sol léger est conseillé rapidement après la récolte (mois de janvier - février) il consiste à faire un léger travail du sol pour créer en

surface du sol une couche de terre pulvérisée. Cela coupe les remontées capillaires en brisant les capillaires du sol (Voir figure 34) (Lacharme, 2001).

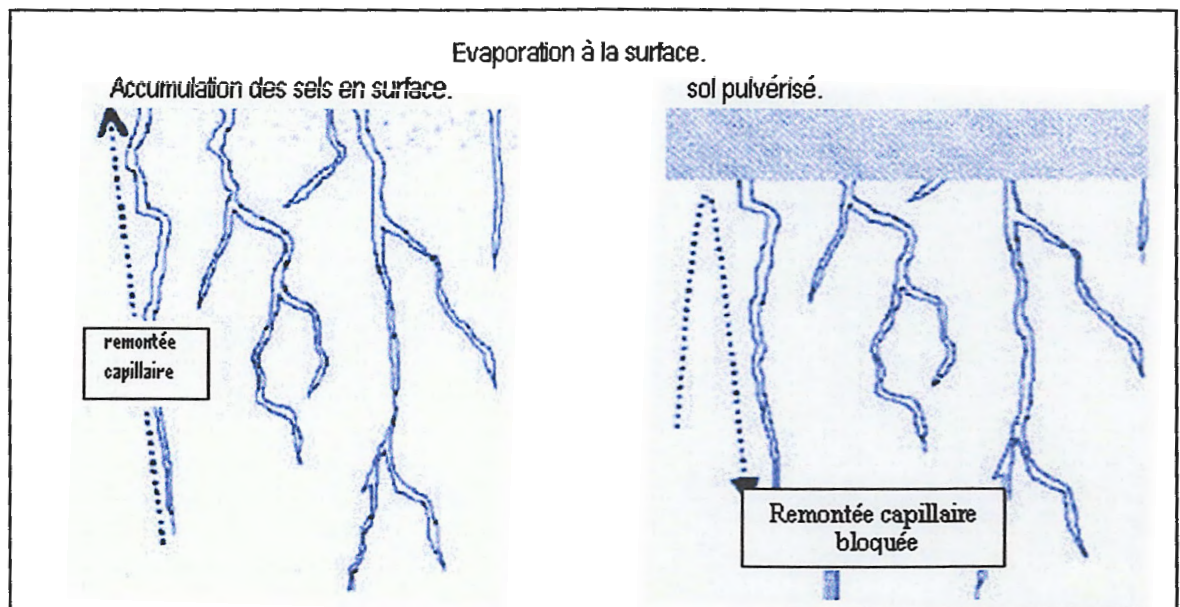


Figure 34: Blocage des remontées capillaires. (Lacharme, 2001).

- **Lixiviation:** En donnant aux cultures juste un peu plus d'eau que nécessaire - mais sans exagérer- on réduit la salinité dans la zone racinaire et les sels sont transportés dans la couche aquifère qui les disperse, à condition que le drainage naturel soit suffisant (Anonyme, 2002). La lixiviation est efficace quand l'eau salée de drainage est déchargée par les drains à fleur de terre. Elle peut réduire des niveaux de salinité en l'absence des drains artificiels et en présence de drainage normal suffisant, c.-à-d. l'eau accumulée s'écoule sans soulever la nappe phréatique. Elle devrait de préférence être faite quand la teneur en eau de sol est basse et la table d'eaux souterraines est profonde. Pendant les mois d'été, la lixiviation, en règle générale, est moins efficace à cause de la perte de l'eau par évaporation. Le choix réel cependant dépendra de la disponibilité de l'eau et d'autres considérations. Dans quelques régions de l'Inde par exemple, la lixiviation est mieux accomplie pendant l'été car c'est le moment où la nappe phréatique est la plus profonde et le sol est sec. C'est également la seule fois quand de grandes quantités d'eau douce peuvent être détournées pour la récupération. L'effet de la lixiviation du gypse sur le déplacement du sel et le SAR est montré dans la (figure 35) (Abrol et al., 1988).
- **Labour profond :** les sols stratifiés sont difficiles à irriguer de façon efficace, les horizons durcis gênent ou empêchent souvent la percolation profonde de l'eau qui

est essentielle au contrôle de la salinité, un labour profond s'impose alors pour rendre plus perméable les couches du sol (Kenfaoui, 1997).

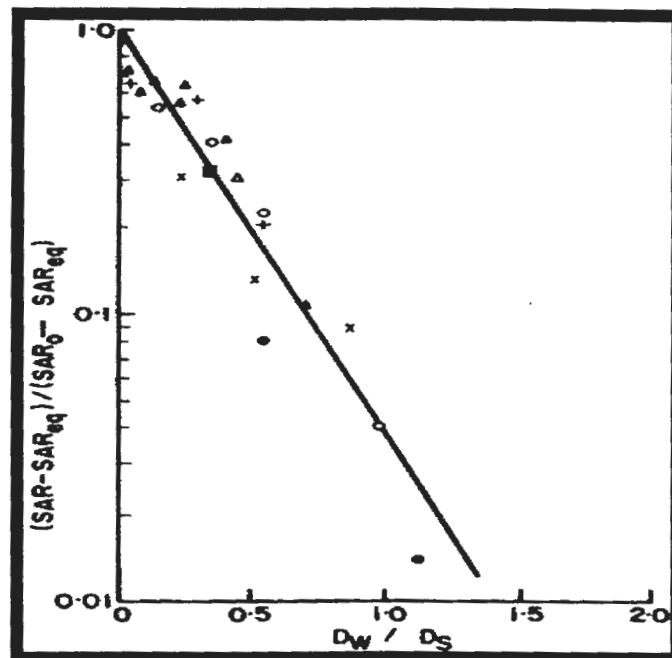


Figure 35 : effet du gypse et de la lixiviation sur le déplacement de sel et le SAR (Khosla et al., 1979 cités par Abrol et al., 1988).

- **Abaissement de la nappe par surélévation des terres :** certains agriculteurs du Sud Tunisien surélèvent périodiquement leur parcelle avec du sable pour soustraire la surface des palmeraies aux influences de la nappe, d'autres pratiquent un amendement très abondant en matière organique sur une couche de sol de 25 cm, sarclée fréquemment, pour casser les remontées capillaires, lorsque l'origine des sels est une nappe proche des surfaces et l'eau est de qualité médiocre (Anonyme, 2006).

4.4. Méthodes biologique:

Les terres salines sont sensibles et réagissent différemment aux diverses pratiques d'aménagement. Le choix de méthodes culturales visant la restauration de sols salinisés dépend de la gravité de la salinisation, de son étendue et des caractéristiques locales. Il faut généralement privilégier une approche biologique, en faisant appel à des régimes particuliers d'assolement et de travail du sol (Eilers et al., 2006; König, 2007).

- **Application de matière organique:** Les sols salins répondent en général moins bien aux applications d'amendements chimiques et il sera donc utile afin d'améliorer les rendements des cultures, en particulier sur les sols sableux, de pratiquer ces amendements humiques (déjections animales, compost, engrais vert, etc.) qui amélioreront directement les performances des micro-organismes du sol, cela peut renforcer la vie du sol (Anonyme, 2003). Aussi, un sol riche en matière organique pourrait retenir davantage l'eau (Eilers et al, 2006; König, 2007). D'après Simonneau et Aubert (1963), l'apport d'une forte fumure organique (engrais verts, fumier) ou du fumier minérale à base d'engrais chimiques qui ne contient pas de chlorures et qui doit être très riche en azote, cet élément se fait pratiquement à défaut dans les sols sahariens, améliorerait la structure des terrains. Et l'utilisation de la tourbe favoriserait les échanges hydriques et gazeux entre le sol salé et la végétation, et permettrait, grâce à son acidité, de maintenir un pH proche de la neutralité (Badot et Crini, 2007).

Paillage : Le paillage de la terre conserve l'humidité du sol et de réduit l'érosion (Anonyme, 2005). Il est bénéfique dans le 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 (Anonyme, 2001).

- **Bio drainage et bio-élimination des eaux d'infiltration :** On peut planter des arbres le long des fossés de drainage. Cela permet de baisser encore le niveau de la nappe phréatique (Lacharme, 2001). Cet abaissement peut être par la plantation de rangées d'arbres (Eucalyptus, Acacias, etc.) ou d'autres plantes halophytes autour des champs agricoles afin d'éliminer l'eau excédentaire du sol. La plantation d'arbres le long de canaux de drainage affectés de pertes, est importante pour assécher le sol et limiter la percolation profonde. Son avantage est qu'il ne présente pas de recours à des installations et matériels externes car c'est un procédé naturel, facile à associer à une approche de développement rural intégré mais présente un contrôle peu précis de la nappe et peu actif dans l'élimination des sels accumulés dans la zone racinaire (figure: 36, 37) (Mermoud, 2006).

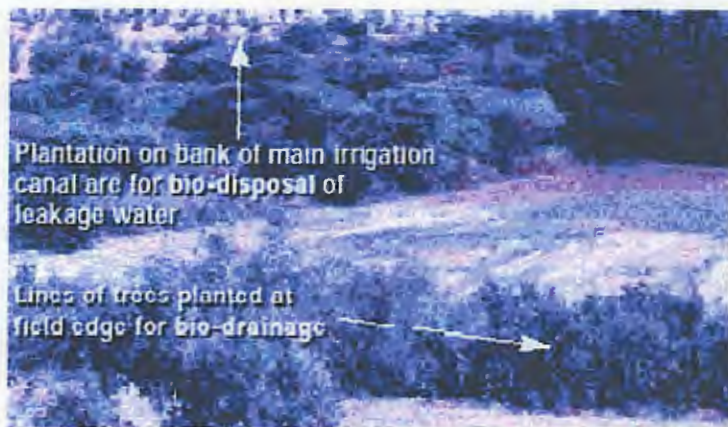


Figure 36: Biodrainage et bioélimination (Mermoud, 2006)



Figure 37: bio- élimination des eaux d'infiltration par l'Eucalyptus (Mermoud, 2006)

- **Agriculture saline et - Désalinisation des eaux (Osmose inverse) :** D'après Poss et al. (2005), le concept de concentration biologique séquentielle, a le principe de concentrer le sel dans les sols de drainage en utilisant la même eau pour irriguer de plantes de plus en plus tolérantes à la salinité. L'eau chargée de sel résultante, est utilisée pour l'aquaculture, puis distillée par l'énergie solaire afin de produire de l'eau potable. Le seul déchet résultant est constitué par les sels qui peuvent être facilement stockés.
- **Phytoremédiation des sols salins, calcaires et sols sodiques :** Pour les sols qui contiennent les origines calcites CaCO_3 de très faible solubilité qui ne fournissent pas le Ca^{2+} , la phytoremédiation peut aider certains sols améliorés durant la culture de certaines plantes tolérantes à la salinité et la sodicité du sol. Cette stratégie d'amélioration travaille au temps de développement des racines pour aider la dissoudre le CaCO_3 , à l'approvisionnement adéquat de Ca^{2+} sans application d'un

amendement (Qadir et al., 2001.), ainsi l'utilisation du CO₂ de respiration racinaire et l'excrétion de protons par les racines pour acidifier le milieu et la libération du calcium. Dans des essais au Moyen Orient la phytoremédiation a prouvé son efficacité dont les résultats sont comparables à ceux obtenus avec le gypse (Poss et al., 2005).

- **L'utilisation de variétés tolérantes à la salinité :** L'introduction de plantes tolérantes à la salinité est l'une des techniques utilisée pour la valorisation des sols salin marginaux (Khaless et Baaziz. 2006). En générale Les problèmes de salinité peuvent être contre balancés par l'utilisation de variétés comme la variété Sahel 201 du riz qui est considérée comme relativement tolérante dans les rizières (Lacharme, 2001) ainsi que la culture des halophytes (Toderich et al., 2002). Selon Shannon (1997), l'amélioration de la tolérance des cultures sensibles et tolérantes au sel permettrait une plus grande utilisation de un approvisionnement en eau saumâtre où les coûts de l'eau sont élevés ou la disponibilité de l'eau est faible .
- **Les cultures fourragères et les plantes vivaces pour gérer les apports d'eau:**On peut empêcher l'eau de s'infiltrer dans le sol des zones d'émergence en dérivant l'eau de surface vers des étangs situés au bas des pentes. Les cultures fourragères et les plantes vivaces (exemple: la luzerne) peuvent jouer un rôle utile, en raison de leur saison de croissance plus longue et de leur capacité d'absorber une plus grande quantité d'eau que les plantes annuelles et ce, à une plus grande profondeur. Ainsi, les cultures fourragères empêchent l'accumulation d'eau souterraine, abaissent la nappe phréatique et assèchent le sous-sol. En outre, elles accroissent la teneur en matière organique du sol et en améliorant la structure, ce qui réduit le risque d'érosion (Erliers et al., 2006; König, 2007).
- **La méthode pépinière repiquage:** La mise en place de pépinières dans des sites indemnes de sel permettra de sauvegarder les jeunes plants de riz, pendant les phases de germination/levée. Lors du repiquage, sa tolérance à la salinité est plus importante et la parcelle peut ensuite être maintenue en eau ce qui va limiter les problèmes de concentration de sel (Lacharme, 2001).
- **Riziculture irriguée:** Est la première méthode de lutte contre la salinité. En effet, les apports d'eau importants de cette culture permettent de nettoyer les excès de sels

présents dans le sol. La double culture limite très grandement les périodes pendant lesquelles le sol est à nu et propice à des phénomènes de remontées capillaires (Lacharme, 2001).

4.5. La gestion hydraulique:

4.5.1. Le drainage :

Le drainage est l'unique solution durable pour maintenir la production agricole, 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 être suffisamment loin pour qu'elle ne puisse pas se retrouver dans la nappe phréatique sous-jacente aux cultures.

4.5.1.1. Pratiques du drainage

a- Le lessivage des sels en excès par le drainage :

C'est une des méthodes qui évitent le problème de la salinité dans les périmètres irrigués qui sont liées à la présence d'une nappe profonde et saine, elle alimente en permanence la zone racinaire en sel au fur et à mesure que l'eau est utile pour la plante. Dans les régions chaudes, l'installation de drains ouverts ou enterrés ou de puits drainant est nécessaire pour entraîner une partie de l'eau salée vers une zone où le sel peut être stocké sans risque. Si la salinité dépasse de loin la tolérance des cultures, le procédé à un lessivage est important pour abaisser la concentration en sel pour rendre la culture possible et restaurer le sol (Kenfaoui, 1997).

Chaque fois que les sols peuvent se débarrasser de ses sels par un drainage suffisant; il ne risque pas la salinité, c'est le cas :

- Des climats tempérés: grâce au pluie d'hivers éliminant le sel hors du profil.
- Des climats arides: lorsque l'irrigation s'accompagne d'un bon réseau de drainage qui élimine l'eau d'irrigation en excès, et avec elle le sel, toujours soluble.
- Ou encore lorsque le sol connaît une période annuelle d'inondation comme c'était le cas de la vallée du Nil avant la construction du barrage d'Assouan, qui a supprimé cette inondation qui permet chaque année au sel de redescendre profondément et d'être évacué vers la mer (Soltner, 2007).

- L'abaissement du niveau de la nappe par le drainage :

La première méthode de lutte contre la remontée capillaire est le rabattement de la nappe phréatique salée par des drains (Lacharme, 2001). On y parvient soit par des canaux de drainage, soit par creusement de très nombreux puits. C'est la solution des puits qui a été adoptée au plus grandes zones irriguées du monde (cas du Pakistan, dont la plaine de l'indus, le Penjab).

Cette technique consiste à provoquer un abaissement de la nappe par pompage dans un réseau de puits régulièrement distribués dans l'espace, de sorte à ce que leurs cônes de dépression se recourent. Méthode utilisée principalement lorsque la nappe doit être abaissée fortement, en particulier pour prévenir une salinisation du sol (salinisation capillaire) (Mermoud, 2006).

L'eau prélevée dans les puits abaisse le niveau de la nappe, utilisée comme eau d'arrosage avec l'eau de rivières, elle fait redescendre le sel dans les couches profondes du sol (Soltner, 2007). Rouahna (2007), propose cette solution en drainant par la lixiviation et la suppression de la source du sodium, et pour cela, Guet (2003) suggère l'application toujours d'une forte irrigation selon.

c- Drainer et apporter du gypse (Drainage et plâtre):

Lorsqu'il s'agit de sol salin dont le complexe argilo-humique est bien pourvu de calcium et le magnésium, l'élimination du sel en excès est possible à condition que l'on puisse à la fois irriguer ou inonder le sol, et éliminer du profil pour drainer l'eau chargée de sel. Mais lorsqu'il s'agit de sol sodique au complexe adsorbant bien garni de Na⁺, l'apport d'eau alcalinise fortement le sol. Il faut à la fois remplacer le sodium par le calcium, et empêcher l'altération du pH. on y parvient par des apports de gypse ou de plâtre en même temps que l'on pratique le lessivage - drainage (Soltner, 2007).

4.5.1.2. Les avantages du drainage profond:

Les avantages du drainage profond sont :

- a- un rabattement de la nappe phréatique en dessous d'une côte telle que, les remontées capillaires soient très limitées.
- b- la création de flux souterrain permettant d'évacuer les sels en excès hors de la parcelle.
- c- de couper les flux souterrains d'eau chargée en sels d'une parcelle à un autre.

Il ne faut pas confondre ce réseau de drainage avec le système de drainage superficiel des parcelles qui sert uniquement aux vidanges des parcelles (Lacharme ; 2001).

4.5.1.3. Situations pour lesquelles le drainage n'est pas envisageable :

Absence de conditions topographiques favorables (rizières) et dépressions. (Lacharme, 2001).

4.5.1.4. Récupération des eaux de drainage :

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, (figure 38). (Anonyme 4, 2001).

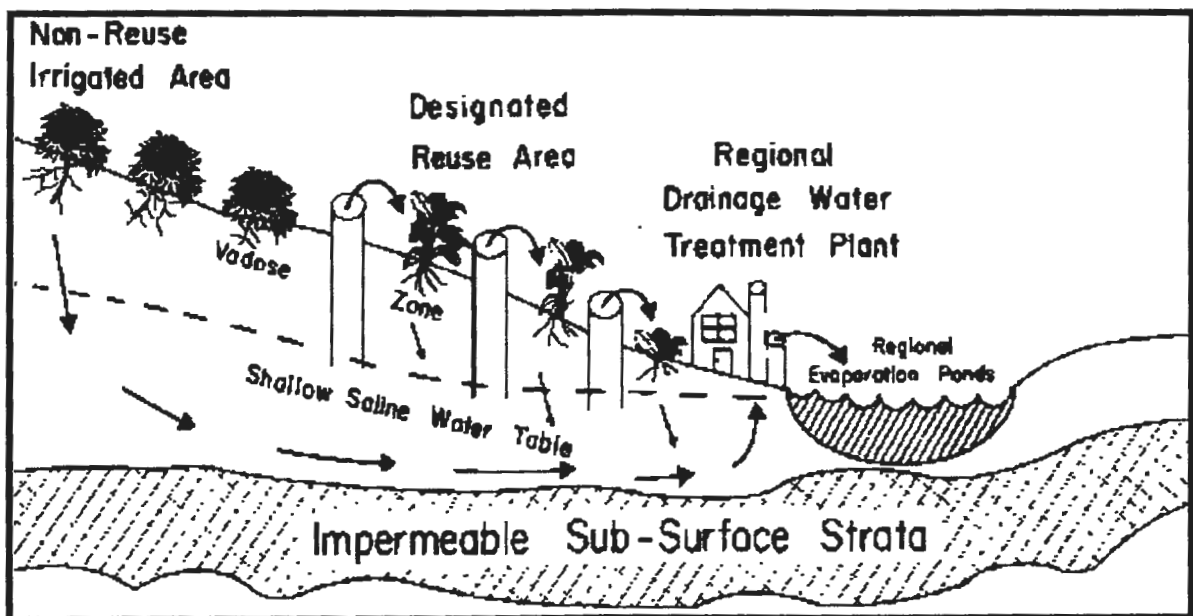


Figure 38: Récupération des eaux de drainage. (Anonyme, 2001)

4.5.1.5. Choix du type de drainage :

Lorsque la salinisation est due à l'utilisation d'une eau saumâtre pour irrigation, il faut un drainage de surface et un drainage artificiel souterrain vertical, si la nappe superficielle est proche, avec une eau de qualité médiocre, un système de drainage artificiel souterrain horizontal est convenable, et serait mieux avec un biodrainage (Anonyme, 2006).

Selon les résultats de Poss et al. (2005), il est déconseillé d'appliquer le type de drainage vertical dans les rizières, il est fortement ralenti, donc la lixiviation devient difficile. Ce ralentissement provient également de piégeage d'air entre la nappe phréatique de moyenne profondeur et la lame de surface. Il en résulte l'existence de deux compartiment d'eau restent disjoints. Les simulations montrent que le piégeage d'air est très probablement un phénomène très fréquent dans les sols rizicoles à structure fine. Les sels doivent être retirés en utilisant la lame d'eau de surface. Il ne s'agit pas de dessaler l'ensemble du profile, mais de dessaler chaque année l'horizon dans lequel le riz développe son système racinal. Dans de nombreux cas, le lessivage est assuré par les fuites dans les diguette ou les débordement par-dessus des dernières à la suite de la pluie. Le drainage de surface est pratiqué dans les zones plates, à très faible pente ou à surface irrégulière, en présence de défauts d'infiltration ou de drainage interne, son objectif est de réduire les risques de submersion prolongée du sol sans provoquer l'érosion.

une bonne gestion du sol se traduit par un drainage approprié selon la situation:

- a. des réseaux d'assainissement (drainage de surface) pour collecter et maîtriser l'eau qui entre et/ou sort du périmètre d'irrigation (anonyme 2005).
- b. le biodrainage: utilisation de la végétation pour absorber les eaux en excès dans les sols.
- c. des systèmes de drainage souterrains pour contrôler le niveau de la nappe phréatique sous la zone racinaire (Anonyme, 2005). Il est rapporté selon œuvres de FAO en 2002, que des fossés ou des tuyaux souterrains peuvent emporter l'eau saline. Un tiers des terres salines gorgées d'eau pourraient être bonifiées grâce à un meilleur drainage et à toute une série de techniques adaptées à la situation locale. Par exemple, au cours des 30 dernières années, le programme national de drainage égyptien a affronté la saturation en eau et la salinité des sols en utilisant différents types de drainages et de stations de pompage, ce qui a permis de faciliter l'écoulement et de réutiliser les eaux de drainage.

Selon Mermoud (2006), le drainage a des effets sur les exportations de substances solubles, car la qualité des eaux de drainage peut varier fortement en fonction de facteurs climatiques, pédologiques et cultureux. On note en général:

- Une réduction des exportations de phosphates, suite à la diminution du ruissellement et du transport solide à la surface du sol.
- Une augmentation des exportations de nitrates, suite à l'accroissement des volumes d'eau infiltrée, surtout dans le cas de nappes perchées temporaires.

4.5.2. Gestion des eaux d'irrigation :

4.5.2.1. Intensité de l'irrigation :

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 (Anonyme, 2001). Il faut éviter les apports d'eau excessifs et essayer de trouver un équilibre entre les besoins de la culture et les apports en eau. Tout apport supplémentaire correspondra à un apport de sels supplémentaire, surtout si la culture ne bénéficie pas de systèmes de drainage (Lacharme, 2001).

Lorsque l'origine de la salinisation est l'eau d'irrigation saumâtre, la solution curative est l'augmentation de la fréquence des irrigations, l'accroissement de l'apport d'eau aux plantes en considérant les besoins de lessivage et/ou association de différentes sources d'eau (Anonyme, 2006).

Tant que l'irrigation reste suffisamment modérée pour satisfaire les besoins des plantes sans rejoindre la nappe salée profonde, celle-ci ne risque pas de remonter (Soltner, 2007).

4.5.2.2. Modification de méthodes d'irrigation :

L'irrigation par submersion ou par aspersion est conçue pour distribuer l'eau uniformément sur toute la surface considérée. Il en résulte une accumulation de la plupart des sels dans l'horizon inférieur de la zone racinaire.

Avec une irrigation à la raie, le sel s'accumule en profondeur du sol de la même manière qu'en submersion, mais il se développe aussi dans les zones exondées. le sel se déplace en profondeur quand l'eau est drainée par gravité.

En irrigation localisée, les sels s'accumulent à la limite de la zone de sol humecté ; il en résulte une forme sphérique humidifiée avec une salinité maximale à la périphérie de la sphère. (Kenfaoui, 1997).

Il est préféré de pratiquer l'irrigation à goutte à goutte qui mesure la quantité d'eau distribuée à la surface de la plante, malgré que l'irrigation par aspersion est plus efficace que l'irrigation de surface, mais elle peut déposer des sels directement sur la plante si l'eau est salée (Anonyme, 2002).

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. (Anonyme, 2002).

En fin, La récupération de sols fortement affectés par le sel grâce à l'irrigation et au drainage a été rendue possible du fait de la composition chimique de l'eau d'irrigation, du faciès des solutions du sol qui évoluait dans la voie saline neutre, et de la teneur importante des solutions en calcium soluble (figure 39) (Hachicha, 2007).



Figure 39: Bonification des sols salés et sodiques des bordures de Chott Jérid : parcelle cultivée et irriguée en plein sols salés et sodiques (Tozeur, Tunisie) (Hachicha, 2007)

Au niveau des sols et des périmètres irrigués il faut une mise en place de réseaux de surveillance de l'évolution de la salinité par des méthodes globales, rapide et in situ (Conductivimétrie Electromagnétique par exemple). Ce diagnostic périodique doit permettre de piloter au plus juste les apports d'eau en relation avec l'intensité et la profondeur du front salin (Loyer, 1991).



Conclusion

Conclusion :

La salinité est un problème permanent pour certains sols et pour cela on doit apporter une attention constante si on veut maintenir et améliorer la vie des plantes. Parmi ces plantes, les glychophytes, qui sont très sensibles aux conditions de la salinité et représentent malheureusement la plupart des espèces cultivées importantes.

La résistance au sel apparaît comme un caractère polygénique contrôlé à différents niveaux d'organisation, de la cellule à la plante entière. La variabilité manifestée par les espèces et les variétés permet d'envisager une sélection de génotypes particulièrement bien adaptés au stress salin. La nutrition minérale -malgré qu'elle est un test classique- elle est importante comme test de sélection à la tolérance à la salinité qui s'ajoute à au critère biochimique.

Pour éviter que la salinité se répande et s'intensifie, le développement des technologies agricoles et une meilleure appréciation de la connaissance existante mais sous-utilisée, de la gestion de ressources, seront les points cruciaux pour satisfaire les besoins écologiques et les demandes alimentaires prévues de la population croissante. Un défi important pour les prochaines décennies réside dans le fait que les environnements de production sont instables et dégradés. À moins que les politiques et les approches changent, de nombreux pays ne pourront pas réaliser une agriculture durable dans l'avenir proche.



Liste bibliographique

Liste bibliographique

Abrol L.P., Yadav J.S.P. and Massoud F.I., (1988) - Salt-affected soils and their management. FAO Soils Bulletin 39, Rome. 131 p.

Agarie S., Shimoda T., Shimizu Y., Baumann K., Sunagawa H., Kondo A., Ueno O, Nakahara T., ro Nose A et Cushman J.C. (2007)- Salt tolerance, salt accumulation, and ionic homeostasis in an epidermal bladder-cell-less mutant of the common ice plant *Mesembryanthemum crystallinum*. Journal of Experimental Botany. Vol. 58, N° 8: 1957–1967.

Alem C., Labhilili. M., Brahmi. K., Jlibene. M., Nasrallah et AFilali-Maltouf. A. (2002)- Adaptations hydrique et photosynthétique du blé dur et du blé tendre au stress salin Hydrous and photosynthetic adaptations of common and durum wheat to saline stress. Elsevier B.V. Comptes Rendus Biologies. Vol. 325: 1097-1109.

Anonyme (1975)- Laboratoire du sol. Méthodes d'analyses physiques du sol 3ème et 4 ème Année. ITAM (Institut de Technologie Agricole de Mostaganem). Algérie. 67p. P : 46, 58.

Anonyme (2001)- Le point sur l'irrigation et la salinité des sols en zones sahéliennes: Risque et recommandation. Handicap International. 35 p. www.cariassociation.org.

Anonyme (2002)- Le sel de la terre: un danger pour la production vivrière .Dossier de fond. FAO ; Article (en ligne). www.fao.org

Anonyme (2003)- Désertification et développement : point de vue. Dossier- Désert. GTD et CARI (Centre d'Actions et de Réalisation Internationales) (d) : 18-36.

Anonyme (2005)-Gestion des sols salinisés par l'irrigation. Salinity brochure. FAO; 2p. Pp 1-2.

Anonyme (2006)- Origines de la salinisation, solutions préventives et curatives possibles. IPTRID, CISEAU (centre d'information sur l'eau agricole et ses usages) et FAO.

Anonyme (2008)- Les éléments toxiques dans l'eau d'irrigation. Lenntech Traitement de l'eau et de l'air. Nederland. [info@ lenntech.com](mailto:info@lenntech.com).

Anonyme (sd)- Absorption des éléments nutritifs par les plantes. Institut Hassan II de l'agriculture et des sciences vétérinaires.

Antipolis S., (2003)- Les menaces sur les sols dans les pays méditerranéens. Etude bibliographique. Plan Bleu: 80 p. P: 53.

Ayers, R.S.; Westcot, D.W. (1994)- Water quality evaluation. Water quality for agriculture.

Badot PM et Crini N (2007)- Les Impacts des Fondants Chimiques (ou sels de déneigement) sur la Végétation riveraine d'une Infrastructure de Transports (A39). Utilisation des méthodes de Bio surveillance. EA 3184 USC INRA Université de Franche-Comté. 7p.

Badraoui M., Bourakhouadar., Jackson E.W., Tessier D. (2002)- Le Générateur d'Acide Sulfurique (SAG) : Une nouvelle technologie pour réhabiliter les sols salins-sodiques. Transfert de Technologie en Agriculture. Bulletin mensuel d'information Net de liaison du PNTTA. Ministère de L'Agriculture, du Développement Rurale et des eaux et des Forêts .Royaume du Maroc.

Batanouny K H. (1993) - Ecophysiology of halophytes and their traduction use in the arab word. In Advanced Course on Halophyte Utilization in Agriculture. Ed CIHEAM/IAM-B, CEC, IAV, UNEP, IDB, UNDP, ISESCO. Agadir. Marocco. 433p. Pp 34-65.

Ben Aïssa I., Bouksila F., Bahri A., Bouarfa S., Chaumont C., Hichri W. (2004)- Gestion de l'eau et des sels au sein d'une oasis du Sud tunisien. Projet INCO-WADEMED Actes du Séminaire Modernisation de l'Agriculture Irriguée Rabat. Thème 2 : Vers une gestion durable de l'irrigation : conséquences sur les options de modernisation.12p.

Ben khaled L., Mortgomez., Honrubia M., Oihabia A. (2003)- Effet du stress salin en milieu hydroponique sur le trèfle inoculé par le Rhizobium. EDIT : INRA, EDP Sciences. Agronomie 23: 553-560.

Benkheira et al. (2007)- Kit pédagogique sur l'environnement dans les zones arides. La Flore. Edition et conception graphique. Altitude communication. FEM DGF. 76p. P33.

-Benlaldj A. (2007)- Effet de la salinité sur la réponse minérale des plantes d'une halophyte *Atriplex halimus* L. Magister ,Université d'Oran Senia, 90 p, P. 08.

-Berger C. (2008)- Calcaire et plantes – Plantes *du sud*. www.plantesdusud.com.

Berthomieu P., Conéjéro G., Nublat A., Brackenbury W.J., Lambert C., Savio C., Uozumi N., Oiki S., Yamada K., Cellier F., Gosti F., Simonneau T., Essah P.A., Tester M., Very A-A, Sentenac H., Casse F. (2003)- Découverte d'un nouveau mécanisme de tolérance des plantes au sel. INRA Communiqué de presse.

Bhivare V. N. et Nimbalkar J. D (1994)- Salt stress effects on growth and mineral nutrition of French beans. *Plant and Soil* 80; 91-98.

Billieffert C et Perraud R. (2003)- *Chimie de l'environnement : Air, eau, sol, déchets.* Première édition, deuxième tirage. p353.

Bohnert H. (2001)- **Halophytes.** *Halophytes* - Plant Sciences. Encyclopedia.com.

Bois G. (2005)- *Ecophysiologie de semis de conifères ectomycorhizés en milieu salin.* Chapitre I. Collection Mémoires et thèses électroniques. Université LAVAL. Canada.

Briat J F, Vert G (2004)- *Acquisition et gestion du fer par les plantes.* Cahiers d'études et de recherches francophones / Agricultures. Vol. 13, No 2: 183-201, Synthèse.

Bulmlwald . E. (2000)- Sodium transport and salt tolerance in plants. Review. *Current Opinion in Cell Biology.* Vol. 12 : 431-434.

Calu G. (2006)- *Effet du stress salin sur les plantes. Comparaison entre deux plantes : Arabidopsis thaliana et Tellungiella halophila.* Master 1 Recherche Biotechnologies : du gène à la molécule. Pp1-14.

Chavan P. D et Karadge B. A (1980)- Influence of salinity on mineral nutrition of peanut (*Arachis hypogea* L.). *Plant and Soil.* Vol. 54: 3-15.

Chen. C-C et Chen. Y-R. (2005)- Study on laminar hydathodes of *Ficus formosana* (Moraceae) I. Morphology and ultrastructure *Bot. Bull. Acad. Sin.* 46: 205-215.

Çiçek. N et Çakırlar. H. (2002)- The effect of salinity on some physiological parameters in two Maize cultivars. *BULG.J. Plant Physiol.,* Vol. 28 (1-2) : 66-74.

Cluster TC. (2006). *Halotolerant plants.* Cosmos. Ucdavis. Educ.

Coïc Y. et Coppenet M. (1989)- *Les oligoéléments en agriculture et élevage.* INRA, Paris. 114p.

Coran. Sourat : 50, verset : 9.

Couture I. (2004)- Analyse d'eau pour fin d'irrigation. MAPAQ Montérégie-Est. AGRIVISION. 8p : p 1, 2.

Cuin TA., Betts SA., Chalmandrier R and Shabala S. (2008)- A root's ability to retain K^+ correlates with salt tolerance in wheat. Oxford Journals. Journal of Experimental Botany Vol. 59, N° 10: 2697-2706.

De Forges M. (1972)- Irrigation et salinité. CIHEAM – Option Méditerranéenne. <http://ressources.ciheam.org>.

Diédhiou CJ. (2006)- Mechanisms of salt tolerance: sodium, chloride and potassium homeostasis in two rice lines with different tolerance to salinity stress. 132 p. P: 111.

Diep M. H., Louguet P., Laffray D., Garnier et Zerli E. (1995)- Effect of acidity and salinity on the biological and physiological characteristics of coconut (*Coconut nucifera L.*) in the Mekong Delta of VietNam. Enregistrement scientifique n°: 1157. Symposium N°: 14.

Dimmitt M. (2003)- Definition of a Succulent. Arizona-Sonora Desert Museum, 2021 North Kinney Road, Tucson, Arizona 85743 U.S.A. www.desertmuseum.org.

Deriouich A., Ouhsine M., Ouassou A., et Bengueddour R. (2001)- Effet de NaCl sur l'activité du phosphoenol pyruvate carboxylase (PEPC) foliaire et son rôle sur la synthèse du malate et de la proline chez le blé dur (*Triticum durum Desf.*). Research Article. Science Letters, Vol. 3. N°3: 7p.

Dunn R. (2001)- Salt Tolerance of Plants. ww1.agric.gov.ab.ca/deptdocs.nsf/all/agdex3303.

Echevarea G. (sd)- Salinisation des sols. Processus, causes, effets et gestion des sols salés. Module "Ressources Agriculture Environnement" inpl Nancy. INRA.

Eilers R.G., Eilers W.D., Pettapiece W.W et Lelyk G. (2006)- Chapitre 8 - Salinisation du sol. In: Acton D.F. and Gregorich L.J. (dir. de publ.) (1995) -La santé de nos sols: Vers une agriculture durable au Canada. Centre de recherches sur les terres et les ressources biologiques, Direction générale de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa, (Ontario). xiv + 138 pp. www.agr.gc.ca/nlwis-snite/index -page14.

El Asslouj J., Kholtei S., El Amrani N et Abderraouf Hilali A. (2007)- Analyse de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la communauté des Mzamza, au voisinage des eaux usées. *Afrique Science* 03(1): 109 – 122.

Gobot J.M; Michel aragno; Matthey W. (2003)- Le sol vivant. Base de pédologie. Biologie des sols. LE SOL VIVA NT/deuxième édition revue et augmentée. ISBN 2-88074-501-2. Presses polytechniques et universitaires romandes, XH- 1015 Lausanne. France. 568p.

Gorham. (1993)- Mécanisms of salt tolerance of halophytes. In *Advanced Course on Halophyte Utilization In Agriculture*. Ed CIHEAM/IAM-B, CEC, IAV, UNEP, IDB, UNDP, ISESCO. Agadir. Marocco. 433p. Pp 3-28.

Gregorio G. B., Senadhira D., Mendoza R. D., Manigbas N. L., Roxas J. P. and Guerta C. Q. (2002)- Progress in breeding for salinity tolerance and associated abiotic stresses in rice. *Field Crops Research*. Vol. 76 : 91-101.

Guet G. (2003)- Mémento de l'agriculture biologique. Guide pratique à usage professionnel. 2ème édition 2003. Editions Agri- décisions. GROUPE FRANCE AGRICOLE. ISBN 2-912199-12-3. 416 p. P118, p119.

Guignard J-L., Cosson L., Henry M. (1985)- Abrégie de phytochimie. MASSON. Paris, New York Barcelone, Milan, Mexico, São Paulo. P 16, 17.

Gutiérrez-Ruizi. M.E., Sommer I et Siebe. Ch. (1995)-Effects of land application of waste water from Mexico City on soil fertility and heavy metal accumulation: a bibliographical review. *Environ. Rev.* 3(3-4): 318-330. Abstract.

Guyennon P. (2006)- Le remède à la compaction du sol: le sous-solage. Éditeur: Les Publications agricoles franco-ontariennes Inc. (Article en ligne).

Hachicha M. (2007)- Les sols salés et leur mise en valeur en Tunisie. Article scientifique. *Sécheresse*; 18 (1) : 45-50.

Hannink. N. (2005)- Salt of the Earth- How do plants cope? University of Cambridge. SEB Bulletin. www.sebiology.org.

Hatira A., Benmansour B., Grira M et Gallali T. (2005)- Impact des eaux d'irrigation sur l'origine des accumulations gypseuses dans les sols de l'oasis de Metouia (Tunisie). *Etude et Gestion des Sols*, 12, 1 : 43-54.

- Heller R., Esnault R., Lance C. (1998)**- Physiologie végétale. 1 Nutrition. 6^{ème} édition de l'Abrégé. DUNOD. Paris, France. 323p.
- Hopkins W-G. (2003)**-Physiologie végétale. William G. Hopkins, (trad. de la 2^{ème} édition américaine par Serge Rambour, révision scientifique de Charles-Marie Evrard). Physiologie Végétale. Edition. De Boeck Université. 514 p.
- Horie T, Schroeder JI. (2004)**- Sodium transporters in plants. Diverse genes and physiological functions. . Update on Na⁺ Transporters in Plants. Plant Physiology 136: 2457–2462.
- Hssissou Y., Bouchaou L., Krimissa M., Mudry J. (2001)**- Caractérisation de l'origine de la salinité des eaux de la nappe côtière d'Agadir (Maroc). First International Conference on Salt water Intrusion and Coastal Aquifers. Monitoring, Modeling, and Management. Essaouira, Morocco: 23–25. 11p.
- Jabnour M. (2008)**- Adaptation des plantes à l'environnement. Stress salin. Cours stress salin. Diapositive 1: 49p.
- Keener-Chavis P and Sautter L R. (2002)**. Salty *Spartina*. Of Sand and Sea. S.C. Sea Grant Consortium, Charleston, SC, pp. 19, 50-52, 63.
- Kenfaoui A. (1997)**- La salinité des eaux d'irrigation. www.oieau.fr.
- Khadraoui A., (2004)**- Gestion des ressources en eau souterraines au Sahara Algérien. 8p. www.abhs.dz.
- Khales A et Baaziz M. (2006)**- Etude des peroxydases d'écotypes d'*opuntia ficus indica L.* en relation avec le développement dans des conditions de stress salin. Enzymologie et Métabolisme. Congrès International de Biochimie. Agadir, Maroc. p 133.
- Khelil A. (1989)**- Nutrition et fertilisation des arbres fruitiers et de la vigne. Collection, Le cours de biologie. Office des publications universitaires. Ben Aknoun. Alger. 67p. P5.
- Kholtei.S., El Asslouj. J., El Amrani. N et Hilali. A. (2007)**- Analyse de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la communauté des Mzamza, au voisinage des eaux usées. Afrique Science 03(1) : 9 – 122.
- König C. (2007)**- La route du sel, historique, géologie, alimentation. Dossier : sel et Agriculture 7p. www.futura-sciences.com.

- Kotuby-Amacher J., Koenig R, Kitchen B.** (1997)- Salinity and plants tolerance. AG-SO-03. <http://extention.usu.edu/files/agpubs/salini.htm>.
- **Lacharme.** (2001)- « Fascicule 5 » La gestion de l'irrigation des rizières. www.arid-afrique.org.
- Lefranc A.** (2003)- Problèmes corrigés de biologie posé au concours Agro-Véto : INA-ENSA, ENV, ENSG Nancy, Archimède BCPST classe préparatoire et DEUG. Les épreuves corrigées des grandes écoles scientifiques. Edition: ellipses. Paris. 238p. P: 27, 28, 170, 171.
- **Levigneron A., Lopez F., Varisuyt G., Berthomien P. et Casse-Delbar T.** (1995)- Les plantes face au stress salin. Cahier d'Agriculture. 4 : 263-273.
- Lopez J C., Caamarono D., Diaz-Corrajelo A., Méndez L., Vaquero A., Garcia E., Mendoza E., Alonso L., LOzano R et Lopez A.** (2003)-Technicien en Agriculture. Tome I. Edition Cultural, S.A. Madrid- Espagne. ISBN : 84-8055-715-X.
- Loyer JY.** (1991)- Salinité des eaux d'irrigation : Problèmes et solution. Conférence IAM. BARI, Italie, 11p, pp7-8.
- Li X et Zhang W.S.** (2008)- Addendum Salt-avoidance tropism in *Arabidopsis thaliana*. Plant Signaling & Behavior. Landes Bioscience. Vol. 3, N° 5: 1-3.
- Lynch. J, Cramer. G.R, Lauchli. A.** (1987)- Salinity Reduces Membrane-Associated Calcium in Corn Root protoplasts. Plant Physiol. 83: 390-394.
- Maathuis FJM, Amtmann A.** (1999)- K⁺ nutrition and Na⁺ toxicity: the basis of cellular K⁺/Na⁺ ratios. Annals of Botany 84: 123–133.
- Mahmoudi. H, Attia. H, archoun. I, Ouerghi Z et Lachaâl.M.** (2008)- Physiological responses of two *arabidopsis thaliana* isolates, *N 1438* and *Col*, to different salts. In: **Abdelly. C., Öztürk.M., Ashraf. M and Grignon. C:** Biosaline. Agriculture and High Salinity Tolerance. Birkhäuser Basel. Pp 99-105.
- **Majerus M.** (1996)- Plants Materials for Saline-Alkaline Soils. Technical Note: Plant Materials Center. USDA-NRCS Bridger Plant Materials Center, Bridger, MT. MT-TN 26 (Revised). 5p.
<http://www.animalrangeextension.montana.edu/articles/Forage/General/Salt-tolerance.htm>.

Marcum. K.B., Wess G., Ray T.D et Engelke M.C. (2003)- Zoysiagrasses, Salt Glands, and Salt Tolerance. USGA Turfgrass and Environmental Research Online 2(14):1-6. TGIF Record Number: 89667. USA.

Marjoua A et De Marsily G. (1995)- Approche géochimique et modélisation hydrodynamique de l'aquifère de la Chaouia cotière (Maroc): Origines de la salinisation des eaux = Geochemical and hydrodynamic modelling approach of the coastal Chaouia aquifer (Morocco): Salinization water origins. Thèse nouveau doctorat Université de Paris 06, Paris, FRANCE. INIST-CNRS. Résumé.

Mashali, A., Suarez, D.L Nabhan H. & Rabindra R. (2005)- Integrated management for sustainable use of salt-affected soils. Rome: FAO Soils Bulletin. 12p.

Mazliak P et Laval- Martin D. (1995)- Physiologie végétale : nutrition et métabolisme. Hermann, éditeurs des sciences et des arts. Paris. 539p. 2705662537.

Meloni. D.A., Gulotta M.R., Martínez C.A et Antonio M. (2004)- The effects of salt stress on growth, nitrate reduction and proline and glycinebetaine accumulation in *Prosopis alba* Braz. J. Plant Physiol. Vol.16, N° 1.

• **Mermoud A.** (2006 a)- Maîtrise de la salinité des sols. Cours de physique du sol. copie des transparents , version provisoire. EPFL; Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne.

• **Mermoud A.** (2006 b)- Eléments de drainage des sols agricoles. Cours: « Aménagements et équipements du territoire » .Section Sciences et Ingénierie de l'Environnement. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. 49 p.

Mile O., Mészáros I, Veres Sz, Lakatos G. (2002)- Ecophysiological study on the salt tolerance of a pannonian endemism (*Lepidium crassifolium* (W. et K.) in inland saline area. Proceedings of the 7th Hungarian Congress on Plant Physiology,. S6-P04. Acta Biologica Szegediensis. Volume 46 (3-4):249-250. <http://www.sci.u-szeged.hu/ABS>.

Mnayer. D. (2004)- Effets de la fertilisation potassique et du temps d'application sur la production et la qualité technologique des tubercules de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) Mémoire de Diplôme d'Études Approfondies (DEA) Contrôle et Gestion de la Qualité (application à l'agroalimentaire). Institut de Recherches Agronomiques Libanais (IRAL). Agence Universitaire de la Francophonie (AUF). (En ligne).

Mou. Z, Wang. X, Fu. Z, Dai. Z, Han. C, Ouyang. J, Bao. F, Hu.y, and Li. J. (2002)- Silencing of Phospho-ethanolamine *N*-Methyltransferase Results in Temperature-Sensitive Male Sterility and Salt Hypersensitivity in Arabidopsis. American Society of Plant Biologists. The Plant Cell, Vol. 14, 1–13. www.plantcell.org © 2002.

Mouat D., Amos Banin, et Bruce Jones (SD)- SCOPE 53 - Methods to Assess the Effects of Chemicals On Ecosystems. Methods to Assess the Effects of Chemicals on Arid and Semi-Arid Ecosystems.

Desert Research Institute, USA.

<http://www.icsu-scope.org/downloadpubs/scope53/chapter10.html>

Moughli L. (SD)- IV. Salinité et sodicité du sol. Cours Chimie et minéralogie environnementales du sol. Département science du sol. Institut Agronomique et vétérinaire Hassan II. www.iav.ac.ma.

Mozafar A et Goodin J.R. (1970)- Vesiculated Hairs: A Mechanism for Salt Tolerance in *Atriplex halimus* L. California. Plant Physiol. 45, 62-65.

Munns R. (2002)- Comparative physiology of salt and water stress. Plant, Cell and Environment 25, 239–250.

Munns R et Tester M. (2008)- Mechanisms of salinity tolerance. Annual Review of Plant Biology. 59: 651-681.

Nabil M (2008)- Etudes des mécanismes de tolérance au chlorure de sodium et à une contrainte hydrique chez *Acacia nilotica* ssp. *cupressiformis* et ssp. *tomentosa*. Université de Clermont-Ferrand 2, France. Travaux Universitaires - Thèse nouveau doctorat .[Note(s) : [169 p.]] (bibl.: 207 ref.) (Année de soutenance : 1995) (N° : 95 CLF2 1687). Résumé.

Nakayama H., Horie T., Yonamine I., Shinmyo A., Yoshida K. (2005)- Improving salt tolerance in plant cells. Review. Plant Biotechnology 22, 477–487.

Nultsch W. (1996)- Botanique générale. Traduction de la 10^e édition allemande par Miesch R et Sell Y. Edition De Boeck Université.

Nezli I.E., Brinis NR et Labar S. (2004)- Origines de la salinité des eaux de la nappe phréatique de la basse Vallée de l'Oued Mya (Ouargla). Journées scientifiques algéro-françaises (colloque de Ouargla JSAF), université de Ouargla.

Oudija, M. Ismaili et M. Amsa. (2006)- Effet de la concentration en NaCl sur l'Embryogenèse Somatique et sur les capacités de Régénération chez le Blé. AFRICAN CROP SCIENCE SOCIETY. African Crop Science Journal, Vol. 10, N° 3: 211-219.

Pardo J-M and Quintero FJ. Minireview. (2002)- Plants and sodium ions: keeping company with the enemy. *Genome Biology* Vol 3, N° 6 : 1-4.

Prieto S.M. (2005)- La croissance des plantes et l'utilisation des macronutriments dans le poivre (*Capsicum Annum G*). Effet des conditions climatique et de nutrition. Université: Autonoma de Madrid. Thèse de doctorat : Résumé. www.kriptia.com/fr/QUIMICA/4.

Poss. R., Baduila M., Belghiti M., Soudi B., Bellouti A. Grünberger O. et de Hammecker C. (2005)- Gestion de l'eau dans les périmètres irrigués : Maintien d'une production durable et réhabilité des sols salés. Colloque « Irrigation et Développement durable » 2p. www.academie-griciculture.

Qadir M.1; Ghafoor A. et Murtaza G (2001)- Use of saline- sodic waters through phytoremediation of calcareous saline-sodic soils. Edition Elsevier. *Agricultural Water Management*, Vol. 50, N° 3: 197-210.

Robert M. (1996)- Préface de Jacques Vert. *Le Sol : Interface Dans la L'Environnement. Ressource Pour Le Développement.* 3ème cycle et recherche. Collection Sciences de l'environnement. Edition MASSON. paris, Milan, Barcelone. 241 p.

Robinson M., Very A-A., Sanders D and Mansfield T.A. (1997)- How Can Stomata Contribute to Salt Tolerance? *Botanical Briefing. Annals of Botany* 80: 387-393.

Rhoades J.D., Kandiah A and Mashali A.M. (1992)- The use of saline waters for crop production. *FAO irrigation and drainage paper 48.* Food and Agriculture Organisation of The United Nation. Rome, Italy. 209p, P27.

Rhodes D et Nadolska-Orczyk A (2001)- Plant stress physiology. *Encyclopedia of Life Sciences.* <http://mrw.interscience.wiley.com> (abstract).

Richter G. (1993)- *Physiologie et biochimie*, Presses Polytechniques. Universitaires. Romandes, PUF, 526p.

Ricklefs R. E, Gary L. Miller G. L. (2005)- *Écologie.* Traduit par Michel Baguette, Virginie Baguette, Grégory Mahy, Frank D'Amico. Collaborateur Max Bugnicourt. De Boeck Université, 858 p. P59, 60.

Rodríguez-Navarro A et Rubio. F. (2006)- High-affinity potassium and sodium transport systems in plants. *Salinity Special Issue.* doi:10.1093/jxb/erj068. Spain. *Journal of Experimental Botany*, Page 1 of 12.

Rouahna H. (2007)- Relation entre les nappes et la salinité dans les sols gypseux de la région de Ain Beni Noui. Biskra. Mémoire pour l'obtention du diplôme de Magister en Agronomie. Option : Pédologie. Université El Hadj Lakhdar- Batna. Algérie. 98p.

Seaman J. (sd)- Mechanisms of salt tolerance in halophytes: can crop plants resistance to salinity be improved? APS 402 Dissertation Candidate no:000124971. www.shef.ac.uk/aps/mbiolsci/jeni/dissertation.pdf.

Serrano R et Rodriguez-Navarro A. (2001)- Ion homeostasis during salt stress in plants. Elsevier Science Ltd. Current Opinion in Cell Biology. 13:399-404.

Shabala S., Shabala L and Van Volkenburgh E. (2003)- Effect of calcium on root development and root ion fluxes in salinised barley seedlings. CSIRO PUBLISHING. Functional Plant Biology, 30, 507-514.

Shannon M.C. (1997)- Adaptation of Plants to Salinity. United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service U.S. Salinity Laboratory Riverside, California. Advances in Agronomy, Vol. 60: 75-120, p 76.

Schongalla M. (2002)- Physiological adaptations of the red mangrove and the black mangrove to high salinity. on Line: www.jrscience.com/Physiologicaladaptations.html.

Simonneau P et Aubert G. (1963)- L'utilisation des eaux salées au Sahara. Ann. Agro., Vol. 14, N° 5: 859-872.

Skiredj A. (2005) - Besoins des plantes en eau et en éléments nutritifs. Département d'Horticulture/IAV Hassan II/ Rabat/ Maroc. Pp.1-12.

Skiredj. A. (2007) - Fertigation du melon et du pastèque : Calcul des solutions nutritives. Article de Fertigation-s guide pour améliorer la productivité des cultures. www.fertigation-s.com.

Soltner. D, (1986)- Les Bases de la Production Végétale. Le Sol- Le Climat- La Plante. Tome I: Le Sol. 14^{ème} édition. Phytotechnie Générale. 462p.

Soltner. D, (2007) - Les Bases de la Production Végétale. Le Sol- Le Climat- La Plante. Tome II: Le Climat : Méthodologie- Pédologie – Conservation des sols. Bioclimatologie – Agronomie du carbone. 9^{ème} édition. Phytotechnie Générale Collection Soltner: Science et technique Agricole. 352p.



- Stengel. P et Gelin S.** (1998) - Sol: interface fragile. Technology & Engineering .INRA. 213p. P112, 113.
- Tattini and Gucci.** (1999) - Ionic relations of *Phillyrea latifolia* L. plants during NaCl stress and relief from stress. Canadian journal of botany. Can. J. Bot. Vol. 77 n°7: 969–975.
- Tejera, N., Campos, R; Sanjuan, J. et Luch. C.** (2005) - Effect of Sodium Chloride on Growth, Nutrient Accumulation, and Nitrogen Fixation of Common Bean Plants in Symbiosis with Isogenic Strains. Journal of Plant Nutrition , Vol. 28, N° 11: pp
- Tester M et Davenport R.** (2003) - Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants. Annals of Botany 91: 503–527.
- Thomson W.W., Berry W. L and Liu L. L.** (1969)- Localization and secretion of salt by the salt gland. Departments of life sciences and vegetable crops. Botany: Thomson, Berry, and Liu. University of Clifornia. Vol. 63, 310-317.
- Toderich, K.N.1, Tsukatani, T., Black, C.C., Takabe, K., Katayama, Y.** (2002)- Adaptations of Plants to Metal/Salt Contained Environments: Glandlar Structure and Salt Excretion. Kyoto Institute of Economic Research Kyoto University. Discussion Paper : N°552 : 1-18.
- Torne. X., Zubrowsky G., Levin S.** (2007)- Désertification et changement climatique au sud du Maroc.
- Tourte Y., Bordonneau M., Henry M et Tourte C.** (2005)- Le monde des végétaux: Organisation, physiologie et génomique. Cours et ACM. Dunod. Paris. 384 p.
- Tozlu I., Moore G.A et Guy.C.L.** (2000)- Effects of increasing NaCl concentration on stem elongation, dry mass production, and macro- and micro-nutrient accumulation in *Poncirus trifoliata*. Australian Journal of Plant Physiology. Vol. 27 N°1: 35 – 42.
- Turan M. et Sezen.** (sd)- Effect of salt stress on plant nutrition uptake. http://www.toprak.org.tr/isd/can_73.htm
- Villora G., Moreno. D.A., Pulgar G et Romero L.** (2000)- Yield improvement in zucchini under salt stress: determining micronutrient balance. Scientia Horticulturæ Vol. 86, N°3 : 175-183.

Wahid A. (2003)- Review Physiological Significance of Morpho-Anatomical Features of Halophytes with Particular Reference to Cholistan Flora. International Journal Journal of Agriculture of and Biologie., Vol. 5. N° 2: 207–212.

Wentz D. (2001)- Salt Tolerance of Plants. AGRI-FACT. Pratical information for Alberta's Agriculture Industry. Pp 518-17. 2p.

Wincov. (1989)- New Molecular Approaches to Improving Salt Tolerance in Crop Plants. BOTANICAL BRIEFING. *Annals of Botany* 82: 703±710, Article No. bo980731.

Xiong L et Zhu J-k. (2002)- Molecular and genetic aspects of plant responses to osmotic stress. *Plant, Cell and Environment*. 25,131–139.

Yahya.H (2007)- Les miracles scientifiques de dieu dans le coran. Les pluies qui ramènent à la vie des terres. Harun Yahya international. Bookglolobal.net. www.miraclesducoran.com

Yoshida. (2002)- Plant Biotechnology — Genetic Engineering to Enhance Plant Salt Tolerance. *Journal of bioscience and bioengineering*. Vol. 94, No. 6: 585–590.

Zhang Y., Li Q., Zhou X., Zhai C., Li R. (2006)- Effects of Partial Replacement of Potassium by Sodium on Cotton Seedling Development and Yield. *Journal of Plant Nutrition*, Vol. 29, N° 10: 1845 – 1854.

Zhu J-K. (2001)- Plant salt tolerance trends. *Plant Sciences*. 6: 66–71.

Zhu J-K. (2003)- Regulation of ion homeostasis under salt stress. *Current Opinion in Plant Biology*. 6:441–445.

Zid, E et Grignon C. (1991)- Test de sélection précoce pour la résistance des plantes aux stress. Cas des stress salin et hydrique. L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides. Ed. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris, pp. 91-108.

Nom et prénom :

- ❖ *Kemiha Souhila*
- ❖ *Bounit Dalila*

Date de soutenance :

29 Septembre 2008

Thème : Effet de la salinité sur la nutrition minérale des végétaux

Nature du diplôme : Diplôme d'Etude Supérieures en Biologie (D.E.S)

Option : Biologie et Physiologie Végétale.

ملخص:

تملح التربة هو المشكلة البيئية الرئيسية التي يواجهها عدد متزايد من المناطق (الاستوائية ومنطقة البحر الأبيض المتوسط)، حيث سلبا على نمو محاصيلها النباتية بسبب عرقلة تغذيتها المعدنية. لهذا يجب أن تبذل اهتماما خاصا من جانب الرصد المستمر لمنع انتشار الملوحة وتكثفها، باستخدام التقنيات الملائمة (إدارة مياه الري، والصرف، الرش واختيار الأنواع المتسامحة..). للسماح للنباتات بالتغذية المعدنية المثلى، وبعد ذلك الحصول على إنتاج زراعي مرض.

الكلمات المفتاحية: الملوحة، تملح، التغذية المعدنية، الأنواع المتسامحة، المياه والري، الرش، الصرف الصحي.

Résumé :

La salinisation des sols est un problème écologique majeur que doit affronter un nombre croissant de régions (tropicales et méditerranéennes), elle influe négativement sur la croissance de la production des cultures en affectant la nutrition minérale. C'est pour cela qu'on doit y apporter une attention particulière par un contrôle constant de cette dernière. Pour éviter que la salinité se répande et s'intensifie, il faut utiliser des techniques adéquates (une gestion des eaux d'irrigation, lessivage et drainage, choix des espèces tolérantes...) à fin de permettre une nutrition minérale optimale pour les plantes et par la suite une production satisfaisante pour l'agriculture.

Les mots clés : Salinité, Salinisation, nutrition minérale, espèces tolérantes, eau d'irrigation, lessivage, drainage

Summary :

Soil salinization is a major ecological problem that faces a growing number of regions (tropical and Mediterranean), it impacts negatively on the growth of crop production by affecting the mineral nutrition. Therefore we must give special attention by a constant control of the latter. To prevent the spread and salinity increases, it is necessary to use appropriate techniques (management of irrigation water, leaching and drainage, choice of species tolerant ...) in order to allow for optimal mineral nutrition for plants and Following satisfactory for production agriculture.

Keywords: Salinity, salinization, mineral nutrition, tolerant species, water irrigation, leaching, drainage.