

# *Influence des conditions salines sur les propriétés physiques des mélanges sable-bentonite*

conséquences sur le comportement  
écophysiological de la tomate (*Lycopersicum  
esculentum* Mill.)

**Par : BENKHELIFA Mohamed**

Directeur de Thèse M. TESSIER Daniel Directeur de Recherche à l' INRA Paris  
Co-Directeur de Thèse M. DAOUD Youcef Professeur à l'INA d'El Harrach Alger  
Soutenue le 09 décembre 2007

Devant le jury composé de : M. DJILI Kaddour Professeur à l'INA d'El Harrach Alger Président M.  
BELKHODJA Moulay Professeur à l'Université d'Oran Examineur M. AÏDAOUI Abdallah Professeur  
à l'INA d'El Harrach Alger Examineur M. HALILAT Mohamed Tahar Professeur à l'Université  
d'Ouargla



# Table des matières

Dédicace . . .	5
ص-خلم . . .	6
Résumé . . .	7
Abstract . . .	8
Remerciements . . .	9
Liste des abréviations . . .	11
<b>INTRODUCTION GENERALE . . .</b>	<b>13</b>
<b>Chapitre I Importance et rôle de l'argile dans les propriétés des sols sableux soumis aux contraintes abiotiques de salinité et sodicité . . .</b>	<b>16</b>
Introduction . . .	16
1.1 Rôle de l'argile dans les propriétés des sols . . .	16
1.2. Conséquences sur le comportement hydrique du sol . . .	23
1.3 Cas des sols arides . . .	25
1.4 Cas des sols littoraux . . .	27
1.5 Contraintes abiotiques de salinité et de sodicité . . .	29
1.6 Conductivité hydraulique . . .	33
1.7 Indicateur biologique : la tomate . . .	34
1.7.1 Sélectivité . . .	37
1.7.2 Exclusion . . .	37
1.7.3 Excrétion . . .	38
<b>Chapitre II Caractérisation des matériaux d'étude : sables et argiles . . .</b>	<b>40</b>
Introduction . . .	40
II.1 Sables . . .	42
II.2 Argiles . . .	47
II.2.1 Présentation des gisements . . .	47
II.2.2 Caractérisation des argiles . . .	49
II.3 Discussions et conclusion . . .	68
<b>Chapitre III Etude des propriétés d'hydratation des mélanges en fonction de la dose de bentonite, du potentiel matriciel (pF) et de la salinité/sodicité . . .</b>	<b>70</b>
III.1 Etude des propriétés d'hydratation des mélanges en fonction de la dose de bentonite et du potentiel matriciel (pF) . . .	71
Introduction . . .	71
III.1.1 Matériels et méthodes . . .	71
III.1.2 Résultats et discussions . . .	73
III.1.3 Importance relative de la nature du sable par rapport à la phase argileuse dans la rétention en eau du mélange . . .	74
Conclusion . . .	77
III.2 Etude des propriétés d'hydratation des mélanges en fonction de la dose de bentonite et de la salinité et la sodicité . . .	78
Introduction . . .	78
III.2.1 Matériels et méthodes . . .	78
III.2.2 Résultats et discussions . . .	80

Conclusion . . .	90
Chapitre IV Effets de la salinité et de la sodicité sur la conductivité hydraulique saturée de mélanges de sable et d'argile . . .	92
Introduction . . .	92
IV.1 Matériels et méthodes . . .	92
IV.1.1 Dispositif expérimental . . .	92
IV.1.2 Matériaux : sable et argile . . .	93
IV.1.3 Obtention de la solution saline . . .	93
IV.1.4 Dispositif de mesure de la conductivité hydraulique . . .	93
IV.2 Résultats et discussions . . .	95
IV.2.1 Première série : sable 1 . . .	95
IV.2.2 Deuxième série : sable 2 . . .	96
IV.2.3 Discussions . . .	96
Conclusion . . .	100
Chapitre V Effets de la salinité et de la sodicité sur le comportement de la tomate ( <i>Lycopersicon esculentum Mill.</i> ) cultivée sur un sol sableux amendé par la bentonite . . .	101
Introduction . . .	101
V.1 Comportement morphologique et racinaire de la tomate cultivée dans des mélanges d'un sable et deux formes de bentonite Objectif de l'étude . . .	102
V.1.1 Matériels et méthodes . . .	102
V.1.2 Résultats et discussions . . .	106
V.2 Effets de la salinité et de la sodicité sur le comportement de la tomate cultivé dans des mélanges de sable et de bentonite de Maghnia 1 Objectif de l'étude . . .	109
V.2.1 Matériels et méthodes . . .	110
V.2.2 Résultats et discussions . . .	112
Conclusion . . .	122
Chapitre VI Discussions et conclusions . . .	124
<a href="#">Références Bibliographiques</a> . . .	129

## Dédicace

*A ma très chère mère qui porte pour moi toute l'affection et l'amour, elle ne m'oublie jamais dans ses prières A la mémoire de mon cher père que Dieu le bénisse, Avec beaucoup de tendresse et une douce pensée à ma femme qui me supporte, Avec beaucoup d'affection, à tous mes chers frères, Abdallah, Dadi, Toufik, El Hadj et Zine Eddine et chères sœurs Malika, Fadila, Houria, Soria, Yamina, Zohira, Fouzia et Souhila, A mes très chers enfants :Abdeghaffour, Hadj Ahmed, Meriem, Wissam et Anissa, A tous, je dédie ce modeste travail*

ص-خلم

##### ##### ##### ##### ## ##### ##### # ##### # ##### ##  
 ##### ##### ##### ##### ##### # ##### # ##### #####  
 ## #####. ## ## ##### ##### ##### ##### #####  
 ##### ##### ##### ##### # ##### ##### ## #####  
 ##### ##### #####. ## ##### ##### ##### ##### ## #####  
 ##### (##### ## ##### ## ##### # #####) #####  
 ## ##### (## ## #####)# ## ##### ##### ##### ## #####  
 ##### ##### (## ## #####) ## ##### ##### ##### #  
 #####.

## ##### ## ##### ##### # ##### ##### # #####  
 ##### # ##### ##### #####. ##### ## ##### ## ##  
 ##### ## ##### ##### ##### ## ##### ## #####  
 ##### ##### ##### ## ##### ##### ##### #####  
 ##### ##### #####-#####. ## ##### ## ## ##### ## #####.  
 ##### # ##### ##### ## ##### ##### ## ##### ##### ## #####  
 ##### # #####. ## ##### ##### ##### ##### ## ##  
 ##### ##### ##### ##### ##### ##### ##### #####. ##  
 ##### ##### ##### ##### ##### ## ##### ## ## ##### ## #####  
 ##### ##### ##### ## ## ##### # ## ##### ## #####.

##### ## ##### ## ##### ##### ## ## ##### # ##### ##  
 #####. ##### ## ##### (## ## ## ##) #####  
 ##### #####. ##### ## ##### ## ##### ## #####  
 #####. ## ##### ##### ## ##### ##### ## #####  
 ## ## ##### # ## ##### ##### ##### # #####  
 ## ## ## #####.

##### #: ##### # ##### # #####  
 ##### # ##### # ##### # ##### # ##### # ##### # #####  
 ##### # ##### # ##### # ##### # #####.

---

## Résumé

Les sols sableux, pauvres en particules fines, sont réputés pour leurs déficiences chimiques et physiques. Dans les zones arides et semi-arides, le recours à un amendement argileux est envisagé pour corriger les carences des propriétés originelles de ces sols en particulier la rétention en eau utile. Ce travail a pour objectif d'étudier l'influence de l'ajout de bentonite de Maghnia, argile de gisement, sur les propriétés physiques de matériaux sableux du plateau de Mostaganem (Nord-Ouest d'Algérie) soumis à des contraintes abiotiques de salinité et de sodicité.

Le premier résultat montre que cette bentonite modifie totalement les propriétés physiques et hydriques des mélanges argile-sable. En plus de son effet bénéfique sur les caractéristiques d'hydratation, elle permet d'atténuer les effets des contraintes de salinité et de sodicité remarqués sur les propriétés du mélange et sur les caractéristiques morphologiques d'un bioindicateur : la tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.). Néanmoins, des différences importantes sont observées en fonction de la granulométrie du sable. Il s'avère que le caractère grossier et l'étalement de la texture de ce dernier agissent en faveur d'une meilleure atténuation des effets de la salinité et de la sodicité sur les propriétés du mélange et de la plante. Cette importante remarque est également observée à travers la conductivité hydraulique saturée (CHs) des mélanges de bentonite avec le sable. Pour le sable grossier la salinité permet de maintenir, même aux fortes valeurs du SAR et de la teneur en argile, une CHs significative.

Une des particularités de l'argile de Maghnia utilisée concerne sa nature et la présence de carbonate de calcium dans ce matériau naturel. En comparaison avec celle de Mostaganem (un autre gisement situé à l'est de celui de Maghnia), elle apparaît beaucoup moins sensible à la sodicité. Ceci qui nous amène à considérer que dans l'utilisation de matériaux argileux, l'état de départ de l'argile est important. La bentonite de Maghnia apparaît ainsi bien adaptée à l'amélioration des sols sableux, non du fait de ses caractéristiques minéralogiques mais du fait de sa forme cationique naturelle et de la présence de calcite en son sein.

**Mots clés :** zone aride et semi aride, sol sableux, bentonite, salinité, sodicité, teneur en eau, potentiel matriciel, conductivité électrique, conductivité hydraulique saturée, densité racinaire, tomate.

## Abstract

The sandy soils, poor in fine particles, are reputed for their chemical and physical deficiencies. In the arid and semi-arid zones, the recourse to a clay amendment is considered to improve the deficiency of their original properties in particular their available water capacity. This work has for objective to study the influence of Maghnian bentonite, a clay deposit, on the physical properties of sandy materials of the plateau of Mostaganem (Northwest of Algeria) submitted to abiotic constraints of salinity and sodicity.

The first result shows that this bentonite modifies completely the physical and hydric properties of the clay mixture sand. In addition to its beneficial effect on the hydration properties, it allows to attenuate the effects of the constraints of salinity and sodicity observed on the properties of the mixture and on the morphological properties of a bio-indicator: the tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Nevertheless, some important differences are observed according to the texture of the sand. It shows that the coarse character and the texture distribution of the sand acts in favour of a better attenuation of the effects of the salinity and the sodicity on the properties of the mixture and to the plant. This important remark is also observed through the saturated hydraulic conductivity (HCs) of the mixture. For the coarse sand the salinity permits to maintain, even to the strong values of the SAR and the content made of clay, meaningful HCs.

One of the particularities of this used clay of Maghnia concerns its nature and the presence of calcium carbonate in this natural material. In comparison to Mostaganem clay (another deposit located to the East of the one of Maghnia), it appears less sensitive to the sodicity. That made us considering that in the clay material use, the initial state of the clay is important. The bentonite of Maghnia appears thus well adapted to the sandy soil improvement, not only for its mineralogical characteristics but also for its natural cationic form and for the calcite presence in it.

**Key words:** arid and semi arid area, sandy soil, bentonite, salinity, sodicity, water content, matrix potential, electrical conductivity, saturated hydraulic conductivity, root density, tomato.



---

## Remerciements

Au moment où s'achève la rédaction de la présente thèse il m'est tout particulièrement agréable d'exprimer mes sincères remerciements à l'ensemble des personnes qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail.

Je commencerai par exprimer mes sincères remerciements à Djili Kaddour, Professeur à l'INA d'El Harrach, pour avoir bien voulu présider le jury de soutenance, je lui en suis très reconnaissant.

Mes remerciements les plus sincères et ma gratitude se dirigent vers Belkhodja Moulay en sa qualité de Directeur de thèse et Professeur à l'Université Essenia d'Oran, pour sa présence et son aide pertinente tout au long de ce travail, pour cela je lui exprime toute ma reconnaissance.

Il m'est agréablement opportun d'exprimer toute ma gratitude à Daoud Youcef, Co-Directeur de thèse et Professeur à l'INA d'El Harrach, pour ses précieux conseils et son aide tout au long de ce travail avec beaucoup de pertinence.

Je souhaite témoigner de toute ma gratitude à Daniel Tessier, Directeur de recherche à l'INRA de Versailles pour m'avoir accueilli à l'unité Pessac de Science du Sol et pour m'avoir ouvert grande la porte des laboratoires de l'unité pour effectuer toutes les analyses de caractérisation des échantillons d'études (rayons X, minéralogie et MET). Je ne pourrai jamais lui rendre grâce pour la confiance qu'il m'a accordée et l'entière pertinence avec laquelle il m'a assisté. Je lui saurai bon gré pour avoir bien voulu honorer de sa présence le jury de soutenance.

Ma reconnaissance s'adresse également à Aïdaoui Abdallah, Professeur à l'INA d'El Harrach, pour avoir bien voulu honorer le jury de soutenance de sa présence.

Je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à Halilat Mohamed Tahar, Professeur à l'Université d'Ouargla, pour avoir bien voulu faire partie du jury de soutenance. Je lui exprime là ma reconnaissance pour son aide et ses précieux conseils.

Nombreuses sont les personnes qui à l'Unité de Sciences du sol m'ont apporté leurs concours et dont la disponibilité, la compétence et l'efficacité ont permis le bon déroulement de ce travail durant mon stage à l'INRA. C'est l'ensemble du personnel scientifique et administratif que je souhaite remercier et plus particulièrement :

Philippe Cambier pour m'avoir apporté ses compétences sur le plan chimique et pour son aide et son hospitalité lui et sa femme avec leurs deux charmants enfants. Christian Mougin pour son aide et ses encouragements. Folkert Van Oort, pour ses encouragements. Jeanne Chantal Dur pour sa précieuse aide au granulomètre laser et au MET pour le traitement des images. Françoise Elsass pour son assistance dans l'utilisation du logiciel ImageJ et ses précieuses orientations. Miguel pour sa disponibilité et ses précieuses informations durant le traitement des échantillons aux rayons X. Jean Pierre Leydecker pour sa précieuse aide et assistance informatique en compagnie de Nicole qui en plus m'a aidé dans l'acquisition de documents non disponibles à l'INRA. Jean Paul Laperrony pour m'avoir assisté dans la préparation des échantillons en vue de leur passage au MET. Jean Pierre Petraud pour sa précieuse aide pour l'acquisition des images des sables, sans oublier Eliane, Nelly, Christiane, Céline....Je profite de cette occasion pour témoigner de ma profonde sympathie à l'égard de toute l'équipe de l'Unité Pessac qui pendant 15 mois de stage m'a permis d'effectuer mon travail dans de très bonnes conditions et durant lesquelles je ne me suis jamais senti étranger. Je ne voudrais pas citer de noms mais je voudrais que chaque personne trouve ici l'expression de mes remerciements et de ma reconnaissance.

Je voudrais enfin exprimer mes remerciements les plus sincères particulièrement à mon cousin Amine qui m'a beaucoup soutenu durant tout mon stage, je lui souhaite beaucoup d'avenir et de bonheur en compagnie de sa femme et de leurs trois adorables enfants. Mes remerciements se dirigent également à mes trois grands amis Mohamed et Hocine Arbaoui ainsi que Abdelhakim Merzoug pour leurs précieux encouragements.

Je ne peux oublier mes collègues avec qui j'ai passé d'agréables moments à l'INRA et qui grâce à eux a régné la bonne humeur et ont contribué aussi par nos discussions et nos détente à la bonne marche de ce travail et au tissage de liens d'amitié, je remercie Danilo, Christelle Fernandes, Sébastien, Julien, Jérôme, Djamel, Rachid, Diego, Raquel, Rezki, Mahmoud et Toufik.

Je remercie également l'équipe des ingénieurs de l'INSID d'El Matmore ainsi que celle de BENTAL du port de Mostaganem pour leur précieuse collaboration.

Pour terminer, j'exprime avec beaucoup d'émotion un geste d'amour et d'affection à toute ma famille, mes parents, ma femme, mes enfants, mes frères, mes sœurs, mes tantes, mes oncles, mes cousins et cousines ainsi qu'à toutes nos belles familles.

---

## Liste des abréviations

- Å : angström =  $10^{-9}$  m
- ATD : analyse thermique différentielle
- [C] : concentration de la solution saline
- C.U : coefficient d'uniformité
- C/N : rapport carbone sur azote
- C<sub>11</sub> : couche n° 11 du gisement de Mostaganem
- C<sub>14</sub> : couche n° 14 du gisement de mostaganem
- CaCO<sub>3</sub> : carbonate de calcium
- CE : conductivité électrique
- CEC : capacité d'échange cationique
- CH : conductivité hydraulique
- CHs : conductivité hydraulique saturée
- $\text{cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$  : centimoles par kilogramme
- $\text{cmol}^+ \cdot \text{l}^{-1}$  : centimoles par litre
- CV : coefficient de variation
- $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$  : déci-Siemens par mètre
- Fig. : figure
- $\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$  : gramme par litre
- Ia : indice d'arrondi
- Is : indice de sphéricité
- kPa : kilo-Pascal
- MET : microscopie électronique à transmission
- Oc : octaédrique
- pF :  $\log_{10}$  du potentiel matriciel exprimé en cm
- RU : réserve utile du sol
- RFU : réserve facilement utilisable du sol
- Sab-Mag : mélange sable + bentonite de Maghnia
- Sab-Mos : mélange sable + bentonite de Mostaganem
- SAR : taux d'absorption en sodium (sodium adsorption ratio)
- SAT : surface agricole totale
- SMg1 : mélange sable + bentonite de Maghnia (échantillon 1)
- SMs14 : mélange sable + bentonite de Mostaganem (échantillon C<sub>14</sub>)
- $\text{T} \cdot \text{ha}^{-1}$  : tonnes par hectare
- Té : tétraédrique

- W/A : teneur en % par dose d'argile
- $\mu\text{m}$  : micromètre =  $10^{-6}$  m

---

# INTRODUCTION GENERALE

Les données de la littérature montrent que 64% des zones arides et 97% de celles hyperarides du monde sont concentrées en Afrique et en Asie (Groenland et Szabolcs, 1994). En Algérie, les zones arides et semi arides occupent 95% du territoire (Halitim, 1984). Les sols dans ces régions, en majorité sableux, diffèrent de ceux des zones humides par des propriétés liées à leur insuffisance en humidité. Leur matière organique compte moins de 1% et leur capacité d'échange cationique ne dépasse pas 5 à 6 meq.100 g<sup>-1</sup> de sol (Haseltine, 2005 ; Halilat, 1998). Ils sont depuis longtemps considérés comme structurellement inertes du fait de leur squelette rigide et leur structure massive (Hartmann, 1991 ; Lamotte, 1995 ; Bortoluzzi, 2003). De ce fait, ils sont vulnérables aux phénomènes de dégradation physique, chimique et biologique (Lal, 1990).

Les travaux de Chamayou et Legros (1989) et Tessier (1994) indiquent l'existence de corrélations entre la capacité de rétention en eau du sol et sa teneur en argile et en limons fins. En fonction du type d'argile ajouté ou présent dans un sol sableux, la capacité d'échange cationique augmente de 8 à 100 meq.100g<sup>-1</sup> de sol (Haseltine, 2005). Pour le groupe des montmorillonites, Bousnina et Mhiri (1997), Benkhelifa et Daoud (1998) et Halilat et Tessier (2006), notent une nette amélioration des caractéristiques physiques, chimiques et hydriques des sols sableux. En effet, la littérature rapporte que l'ajout d'argile est une ancienne technique utilisée localement en Algérie dans les zones arides, semi arides afin d'améliorer la réserve hydrique et la résistance à l'érosion éolienne des sols sableux (Rouvillois Brigol, 1973 ; Nasr, 2004). Selon Petr (1985), des sols sableux amendés avec 10% de leur poids sec en bentonite enregistrent des augmentations de rendement variant de 10 à 40% selon les cultures. D'autres auteurs recommandent en moyenne, une dose d'argile similaire pour une bonification des propriétés physiques et hydriques des sols sableux (Engelthaler, 1985; El Sherif, 1987; Benkhelifa et Daoud, 1998 ; Halilat et Tessier, 2006).

Si les travaux du rôle de l'argile sur les caractéristiques physico-chimiques et hydriques des sols sableux sont relativement nombreux, les effets de ce matériau sur le comportement édaphique du substrat et celui des cultures en conditions de contraintes abiotiques de salinité et de sodicité demeurent insuffisamment étudiés (Halilat et Tessier, 2000). Ces contraintes sont liées à une accumulation de sels solubles dans la rhizosphère due aux pluies rares et aux températures élevées qui caractérisent les régions arides et semi-arides. C'est la qualité de l'eau d'irrigation qui est, très souvent, l'origine de la salinisation des sols (Bertrand et al., 1994). En effet, 10 à 15 % des terres irriguées sont atteintes par le phénomène de salinisation secondaire en Algérie (Cheverry et Robert, 1998), tout en signalant que pour ce pays et beaucoup d'autres pays dans le monde, les disponibilités en eau douce sont de plus en plus limitées (Robert et Cheverry, 1996). Cette limitation d'ordre qualitatif et quantitatif est globalement due à la croissance démographique et au développement économique rapide (Holmgren et Öberg, 2006). Déjà, des prévisions pessimistes de limitation générale des ressources en eau apparaissent dans les régions méditerranéennes, arides et semi-arides (Cheverry et Robert, 1998).

L'objectif de cette thèse est d'étudier l'évolution physique et hydrique de mélanges de sables et d'argile soumis aux contraintes abiotiques de salinité et de sodicité. Or l'addition d'argile pose toujours problème en raison de sa stabilité au sein d'un matériau sableux. En effet, un colmatage partiel de la porosité peut se produire pour ensuite aboutir à des chutes importantes de la conductivité hydraulique et à des problèmes de pénétration racinaire. Ceci est d'autant plus aisé que dans les zones arides et semi-arides, les sols sont soumis à de forts déficits hydriques et par conséquent à de fortes variations de potentiel de l'eau. Il peut en résulter une mobilisation des particules d'argile lors de l'humectation brutale du sol. En plus, se pose le problème de l'accumulation locale des sels au voisinage du système racinaire puisque la plante n'absorbe pratiquement pas les sels et par conséquent tend à les faire accumuler au voisinage de la rhizosphère. Ceci peut induire des problèmes d'alimentation hydrique et par delà une instabilité structurale du matériau lors de l'humectation (Bauder et Brock, 2001 et Chaudhari et Somawanshi, 2004). Dans ce contexte, il est important de bien comprendre les bases scientifiques des propriétés des argiles quand ils sont ajoutés aux sables, afin d'optimiser les caractéristiques des mélanges et valoriser cette technique d'amendement traditionnelle dans le contexte où elle est pratiquée en Algérie (Rouvillois-Brigol, 1973 et Nasr, 2004). Une grande partie du travail sera donc, réservée au comportement physique et hydrique des mélanges sable-argile en fonction de la salinité et la sodicité. En phase finale, nous avons réservé un chapitre à l'étude morpho-racinaire d'un indicateur biologique qui est la tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), en vue d'une approche biologique des effets de la salinité et de la sodicité sur l'état physique des mélanges.

La tomate industrielle est choisie en raison de son niveau de sensibilité moyen à la salinité (Katerji et al., 2000) et sa grande importance économique tant dans le monde qu'en Algérie. Sa consommation enregistre chaque année une croissance de 3% (Amitom, 1998). C'est en fait, la salinité qui représente l'une des raisons majeures des faibles rendements et du manque de qualité chez cette espèce (Mougou, 1984; Sonneveld, 1988 ; Mitchell et al., 1991).

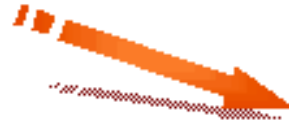
Dans une première étape, nous présenterons une étude bibliographique sur la texture et la nature des constituants d'un sol et l'importance de la fraction argileuse dans le comportement physique et hydrique du squelette en relation avec les contraintes abiotiques de salinité et de sodicité.

Dans une troisième phase, nous proposerons l'étude des caractéristiques physiques et hydriques des mélanges sable-argile en fonction du potentiel matriciel et de la salinité/sodicité.

L'étape suivante sera consacrée à l'étude de l'évolution de la conductivité hydraulique saturée des mélanges sable-argile en fonction de la salinité/sodicité.

Enfin, nous achèverons ce travail par une étude de l'évolution morphologique et racinaire d'une culture de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.) en tant que bio-indicateur de l'état du mélange soumis aux contraintes abiotiques de salinité/sodicité.

L'argile  
représente la  
matière dont on  
est fait



سَمِعَ اللهُ الرَّحْمَنُ الرَّحِيمُ،  
«إِذْ قَالَ رَبُّكَ لِلْمَلَأِكَةِ  
إِنِّي خَالِقٌ بَشَرًا مِنْ  
طِينٍ». سورة ص، الآية 71 .

*Quand ton Seigneur dit aux Anges « je suis  
Créateur d'humains à partir d'argile »  
Sourate Sad, verset 71*

Le **développement  
durable** représente  
ce qui nous assure le  
bien être et la  
continuité de la vie



**« Travailles pour ta vie d'ici bas  
comme si elle durait l'éternité et  
travailles pour la vie de l'au-delà  
comme si tu mourrais demain »**  
*Hadith du Prophète*

**« Nous n'héritons pas la terre  
de nos parents, nous  
l'empruntons à nos enfants »**  
*Antoine de Saint-Exupéry*

# Chapitre I Importance et rôle de l'argile dans les propriétés des sols sableux soumis aux contraintes abiotiques de salinité et sodicité

## Introduction

Les zones arides et semi-arides caractérisées par un déficit en eau et une forte croissance démographique, regroupe plus de 90% des pays en développement du monde (Asma et al., 2002). Leur superficie totale est estimée à près de 25 millions de km<sup>2</sup>, ce qui correspond à près de 37% des sols de la planète terre. Près de 115 millions d'hectares souffrent d'érosion hydrique et 42 autres d'érosion éolienne (Le Houerou, 2000 et 2004). De ce fait, la désertification touche  $\frac{1}{5}$  de la population mondiale avec près de 70 % des terres arides et  $\frac{1}{4}$  de la surface émergée du globe (Tolba, 2001). L'érosion ajoutée à la salinisation des sols accroissent de plus en plus, les risques de désertification des zones vulnérables dont particulièrement la région méditerranéenne (Holmgren et Öberg, 2006).

L'Algérie, avec 95% de ses terres arides et semi arides, compte parmi les pays les plus touchés (Fig. 1). La dégradation des sols y est intensifiée du fait de la dominance du sable dans leurs textures qui s'étale également aux zones littorales (Halitim, 1984 ; Miossec, 1990).

## 1.1 Rôle de l'argile dans les propriétés des sols

La texture représente l'une des données les plus importantes du sol et est considérée comme la clé de sa fertilité. Elle est en rapport avec beaucoup d'autres de ses propriétés et contrôle son comportement physique, chimique, hydrique et mécanique. Par convention la texture d'un sol se divise en quatre classes majeures (Tableau 1) :

La texture d'un sol est donc sa teneur en sable, limon et argile. Sa détermination nécessite une destruction des ciments et une individualisation des particules élémentaires.

Tableau 1 – Classes granulométriques des constituants du sol (Duchaufour, 2001)

Classe, µm	Nature	Classe, µm	Nature
> 2000	cailloux et graviers	20 - 50	limon grossier
200 - 2000	sable grossier	2 - 20	limon fin
50 - 200	Sable fin	< 2	argile



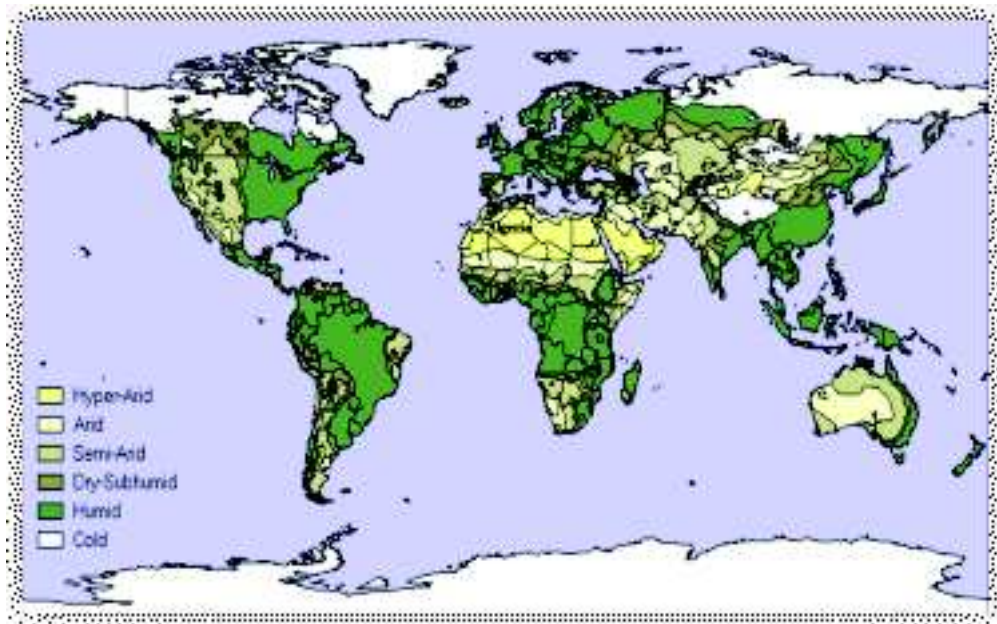


Fig. 1 - Répartition géographique de l'aridité dans le monde (Haseltine, 2005)

Dans un volume de sol, il existe trois phases (Fig. 2) :

*solide* : fraction minérale et organique.

*liquide* : solutions d'ions minéraux et de molécules d'eau remplissant partiellement ou totalement les lacunes entre les éléments solides.

*gazeuse* : composée de gaz (oxygène, azote, dioxyde de carbone) et de vapeur d'eau occupant les espaces laissés par les liquides.

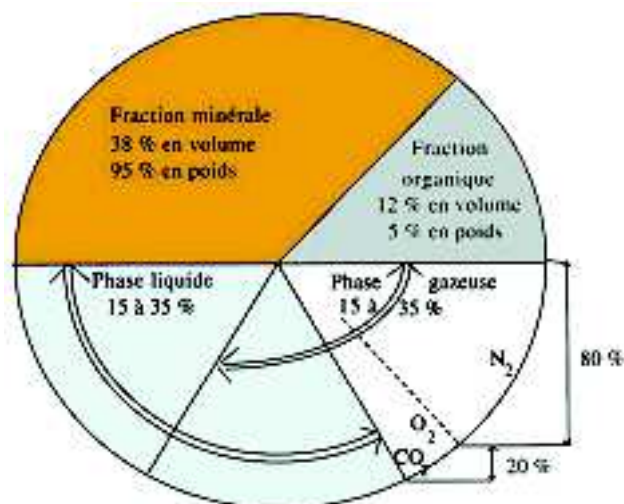


Fig. 2 - Les trois phases d'un sol moyen (Robert et Cheverry, 1996)

Le sol est donc, un système hétérogène, polyphasique, finement divisé et poreux dans lequel la surface interfaciale par unité de volume peut être extrêmement grande. Son caractère dispersé et par conséquent son activité interfaciale donne lieu à des phénomènes de gonflement, de retrait, de dispersion, d'agrégation, d'adhésion, d'adsorption et d'échange ionique etc... (Hillel, 2005).

La porosité d'un sol comprend tout ce qui n'est pas la phase solide. Elle correspond donc au volume total des phases liquide et gazeuse. La porosité représente, en général, 30 à 60 % du volume total du sol. Le sol est, de ce fait, poreux, perméable et apte à être le siège de phénomènes de transport de natures diverses. De toute évidence, les espaces remplis de gaz ou d'eau sont en contact permanent avec les surfaces solides. Il en découle qu'au cours de son transport, la solution du sol peut se charger de substances diverses minérales ou organiques, ou inversement, céder ces éléments à la phase solide. Ainsi, le transport dans le sol d'éléments minéraux ou organiques n'est pas un phénomène inerte mais en très étroite interaction avec la phase solide du sol ou les micro-organismes qui en font partie. C'est pourquoi, il se produit souvent, un transport et en même temps, une modification physico-chimique de ce qui est transporté (Stengel et Gelin, 1998). Les sols n'ont pas la même aptitude à transférer ou à stocker la matière ou l'énergie. C'est même une des sources importantes de différenciation des sols les uns par rapport aux autres. Ainsi, un sable humide est un matériau très filtrant et très conducteur d'eau, tandis qu'un sol argileux est moins conducteur et moins apte à conduire l'eau (Tableau 2). Il s'ensuit, que les sols se différencient simultanément par leurs propriétés de stockage et par leur aptitude plus ou moins grande à transporter les éléments. Il est admis qu'un sol sableux contient une réserve en eau faible mais présente des écoulements

<i>Conductivité hydraulique saturée CHs</i>											
cm.h <sup>-1</sup>	3+000	3+00	3+0	3+	3,	3,+10 <sup>-1</sup>	3,+10 <sup>-2</sup>	3,+10 <sup>-3</sup>	3,+10 <sup>-4</sup>	3,+10 <sup>-5</sup>	3,+10 <sup>-6</sup>
m.j <sup>-1</sup>	3+40	3+4	3,+4	3,+4	3,+10 <sup>-1</sup>	3,+10 <sup>-2</sup>	3,+10 <sup>-3</sup>	3,+10 <sup>-4</sup>	3,+10 <sup>-5</sup>	3,+10 <sup>-6</sup>	3,+10 <sup>-7</sup>
Perméabilité	perméable			semi-perméable		imperméable					
Types de sols	Gravier sans sable ni éléments fins		Sable avec gravier, sable grossier à sable fin		Sable très fin, limon grossier à limon argileux		Argile limoneuse à argile homogène				
					Tourbes						
Possibilité de drainage	Excellentes		Bonnes		Moyennes à faibles		Faibles à nulles				

Tableau 2 – Ordre de grandeurs de la conductivité hydraulique saturée (CHs) pour divers sols (Musy et El Soutter, 1991)

rapides. En revanche, un sol argileux contient au contraire une forte réserve hydrique mais assure une vitesse d'écoulement faible. Entre ces deux situations, un sol limoneux prend une position à peu près intermédiaire (Stengel et Gelin, 1998).

Un sol est sableux, lorsque 70% ou plus de son matériel en poids est constitué de sable (Minasny et McBratney, 2001). Les sables proviennent de la désagrégation d'une roche mère et ils ont souvent une composition proche des matériaux dont ils sont originaires. Ils peuvent être siliceux, silicatés ou calcaires. Les sables étant en majeure partie composé de quartz (SiO<sub>2</sub>), sont pratiquement inactifs du point de vue chimique. Leurs propriétés se distinguent par une faible cohésion qui est à l'origine de leur susceptibilité à l'érosion éolienne et une capacité de rétention en eau réduite. Bien que l'assimilation de l'eau par les plantes y soit relativement facile, en comparaison avec les sols argileux, il demeure que leur grande vitesse d'infiltration ne permet pas une réserve en eau suffisante dans le temps.

Un sol argileux comporte une teneur significative en particule égale ou inférieure à 2 µm (> 30%). Il absorbe beaucoup d'eau et devient plastique et collant une fois mouillé tandis qu'il est dur, compact et cohésif à l'état sec. Les minéraux argileux diffèrent grandement en

propriétés et en proportion. Alors que la mesure de la texture du sol, donne une idée de la quantité de ce matériau dans le sol, elle renseigne très peu sur son caractère spécifique et son activité (Hillel, 2005).

Au sens minéralogique, les argiles sont des phyllosilicates dont l'unité de base est le feuillet. Les feuillets sont des superpositions de couches de tétraèdres de silicium (Te) et d'octaèdres d'aluminium (Oc). Le feuillet est constitué soit de deux couches Te-Oc (feuillet 1/1) comme pour la Kaolinite soit de trois couches Te-Oc-Te. (Feuillet 2/1) comme dans le cas de l'illite ou de la smectite (Fig. 3).

Le sujet des argiles restera pour longtemps d'actualité vu leur caractère microscopique à l'origine de la complexité de leur étude. Autant les développements des techniques microscopiques et de diffraction aux rayons X, accélèrent l'accès à une connaissance approfondie de leurs propriétés, autant il demeure des aires de recherche vierges à investir. De ce fait, il serait vain de prétendre étaler une description détaillée des différents matériaux argileux dans ce chapitre car ce n'est aussi pas l'objectif de l'étude. En revanche, nous présentons une description sommaire des familles d'argiles en fonction de leur structure, leur mode de substitution et l'épaisseur de leurs feuillets. Il existe quatre principaux types d'argile :

**A – Feuillet de type 1/1 dioctaédrique** (Fig. 3), avec pratiquement pas de substitutions, ces argiles sont les plus simples. Dans ce cas, les charges sont faibles ou nulles et sont localisées particulièrement sur les zones de rupture latérales des feuillets.

Les feuillets 1/1 sont pratiquement accolées avec une épaisseur de 7 Å à l'exception de l'*halloysite* qui, moins bien cristallisée, peut retenir une couche d'eau interfoliaire avec une épaisseur de 10 Å. C'est la *kaolinite* qui caractérise ce type d'argile dit à faible activité.

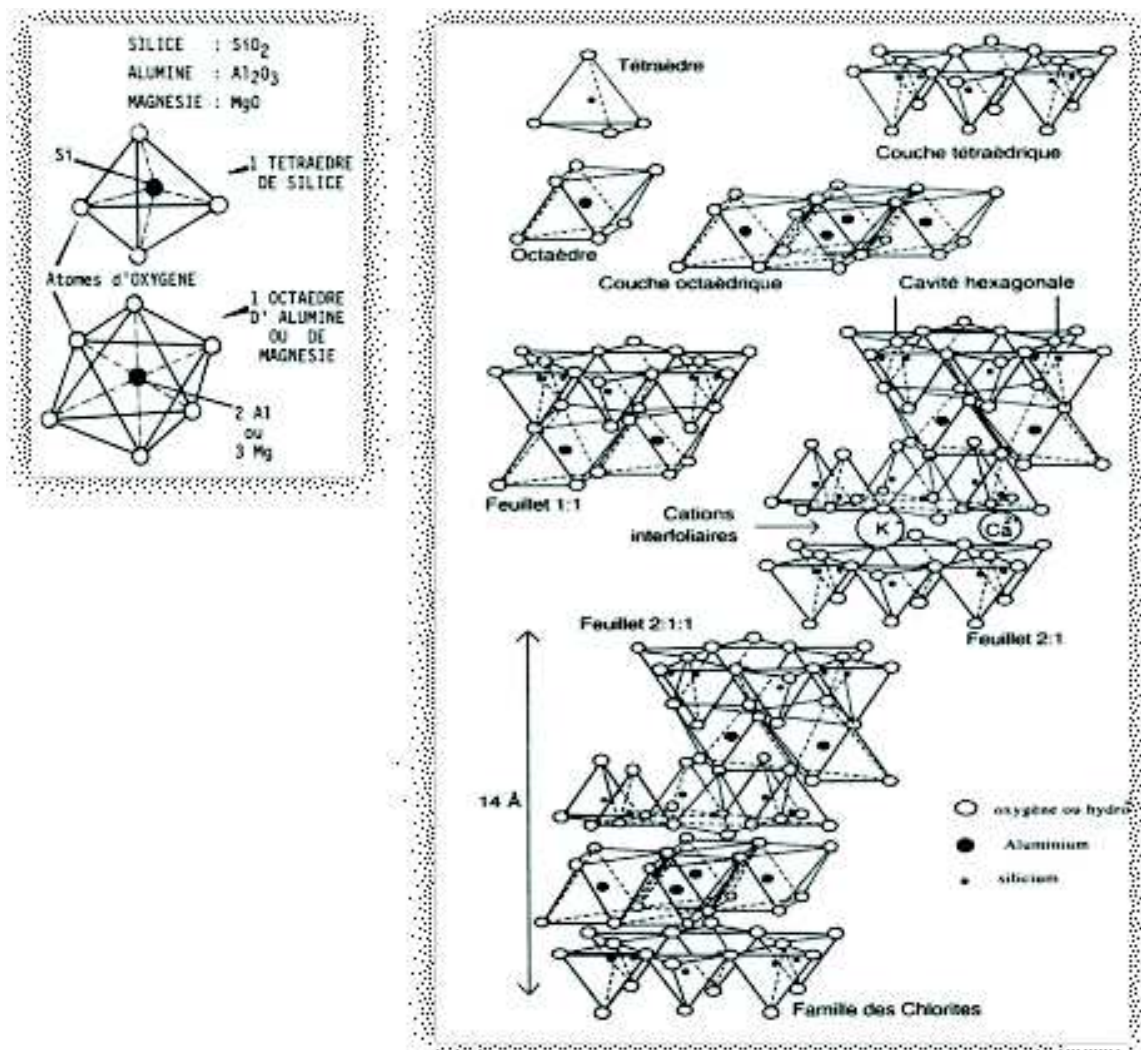


Fig. 3 - Éléments de la structure des Phyllosilicates et les principaux types de feuillets,

B – **Feuille de type 2/1, substitution tétraédrique** (Fig. 3), dans ce cas nous retrouvons deux types d'argile qui dérivent des micas, soit par micro division comme les *illites*, soit par ouverture des feuillets et dispersion partielle ou totale des  $K^+$  remplacés par d'autres cations échangeables comme les *vermiculites*. Réellement, il existe deux orientations, l'une dérivant des micas dioctaédriques telle que la *muscovite* et la seconde des micas trioctaédriques telle que la *biotite* et la *phlogopite*. Les *illites* appartiennent à la première orientation et se transforment par ouverture de certains feuillets en illites ouvertes nommées souvent *vermiculites* dioctaédriques par analogie avec la seconde orientation. Les *vermiculites* proprement dites, sont trioctaédriques.

Dans certains cas de milieux très acides et agressifs tels que les mers et tourbières, des lacunes se créent dans la couche tétraédrique, en conséquence, les charges diminuent et l'ouverture des feuillets augmente donnant naissance à une variété particulière de smectite à faibles charges.

C – **Feuille de type 2/1, substitution octaédrique** (Fig. 4), dans ce type d'argiles, les substitutions octaédriques sont dominantes et permettent un grand pouvoir d'écartement

aux feuillets n'autorisant qu'une fixation temporaire des ions  $K^+$ . C'est le cas des smectites (Fig. 4) qui possèdent un pouvoir de gonflement considérable en présence d'eau par rapport aux autres argiles telles que la kaolinite et l'illite.

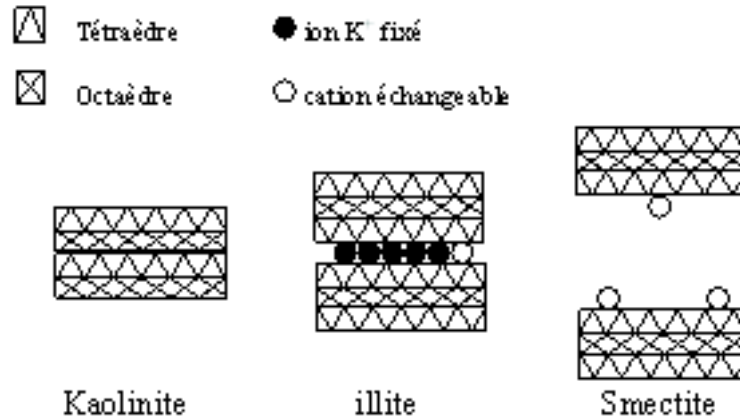


Fig. 3 – Schéma de la structure en feuillets de trois types d'argiles (Duchaufour, 2001)

Leur propriété de s'assembler en quasi cristaux de 8 à 10 feuillets accolés bord à bord, est à l'origine de la formation d'un véritable réseau (Fig. 5). C'est ce réseau qui gonfle en période humide et se rétracte en période sèche enregistrant des fluctuations de volume



Fig. 4 – Modifications du réseau d'une montmorillonite-Ca en fonction de la teneur en eau (Tessier, 1984 ; Chamayou et Legros, 1989)

de l'ordre de 10 à 1 (Tessier, 1984). Les espaces interfoliaires se resserrent pour les  $pF > 4,2$ , ce qui contribue davantage à la diminution du volume total. Elles possèdent aussi une capacité d'échange très élevée par rapport aux kaolinites. Cette propriété est liée à la surface spécifique de ce minéral qui s'élève à près de  $600 \text{ à } 800 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  de sol sec alors qu'elle n'est que de quelques dizaines pour la kaolinite ( $< 40 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  de sol sec) (Chamayou et Legros, 1989).

Il existe plusieurs types de smectites qui diffèrent par la présence ou l'absence de substitutions tétraédriques (Fig. 6). Cette figure montre la composition chimique de la montmorillonite, les différents ions pouvant être présents dans d'autres espèces de smectite sont représentés dans la colonne de droite.

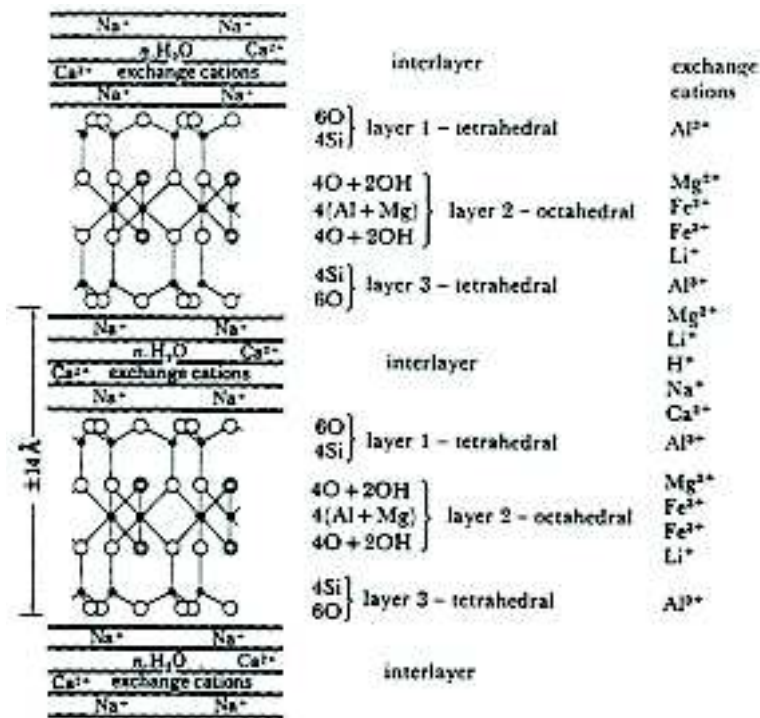


Fig. 5 – Structure minérale des smectites (Odum et Eugene, 1984)

Les vraies montmorillonites n'ont pas de substitution tétraédrique contrairement aux beidellites qui en ont plusieurs. Ces dernières, riches en Aluminium ont des propriétés qui les rapprochent de celles des vermiculites.

D – **Feuillet de type 2/1/1**, ce type d'argile présente un feuillet supplémentaire octaédrique qui s'insère entre deux feuillets semblables à ceux de la vermiculite. C'est le cas des chlorites chez qui, presque toutes les charges sont compensées et de ce fait, la capacité d'échange et le pouvoir de gonflement diminuent fortement. Il existe deux variantes de chlorites selon les milieux d'héritage riches en magnésium ou en aluminium. C'est pourquoi on parle de chlorites brucitiques ou alumineuses.

Le tableau 3, présente succinctement les propriétés des principaux types d'argile évoquées précédemment.

En résumé, il est bon de rappeler que les constituants argileux des sols sont des matériaux extrêmement divisés et que, de ce fait, les propriétés macroscopiques de la matière ne dépendent pas seulement de la structure atomique des phases constitutives, mais aussi et surtout, de la *taille*, de la *forme* et de la *disposition* des individus cristallins les uns par rapport aux autres. En effet, tous ces éléments entrent en jeu dans l'évaluation de la surface totale développée par la phase solide, qui est très grande et à travers laquelle se développent tous les phénomènes liés à l'interface entre les phases solide et liquide.

<i>A<sub>1</sub></i> – <i>MODELE Te-Oc (1/1)</i> <b>Pas de substitution dans les couches : dioctaédrique</b> - épaisseur constante des feuillets (7 Å) <b>KAOLINITE</b> - épaisseur variable (intercalation H <sub>2</sub> O : 10 Å) : Halloysite
<i>A<sub>2</sub></i> – <i>MODELE Te-Oc-Te (2/1)</i> <b>Substitutions tétraédriques : argiles micaées</b> (pouvoir fixateur de K) - <b>Dioctaédrique</b> (Al dominant dans les octaèdres) épaisseur constante des feuillets (10 Å) <b>ILLITES</b> épaisseur variable des feuillets (15 Å) : Vermiculites dioctaédriques - <b>Trioctaédrique</b> (Mg dominant dans les octaèdres) épaisseur constante des feuillets (10 Å) Illites trioctaédriques épaisseur variable des feuillets (15 Å) : <b>VERMICULITES</b>
<b>Substitutions octaédriques</b> Faible pouvoir fixateur de K Épaisseur variable des feuillets (> 20 Å) Dioctaédrique <b>SMECTITES - MONTMORILLONITES</b>
<i>A<sub>3</sub></i> – <i>MODELE Te-Oc-Te-Oc (2/1/1)</i> Épaisseur constante des feuillets Charges nulles <b>CHLORITES</b>
<i>A<sub>4</sub></i> – <i>PSEUDOPHYLLITES (argiles fibreuses)</i> Modèle Te-Oc-Te - Épaisseur 10 Å : Palygorskite

Tableau 3 – Résumé des principaux types d'argiles

Il résulte de ce fait, que les matériaux possèdent des propriétés qui ne dépendent pas uniquement de celles de leurs différents constituants en fonction des proportions respectives de chacun dans l'échantillon mais aussi de ses spécificités. Ces derniers, se présentent en réalité, comme de véritables « systèmes », qui ont une individualité propre et dont les propriétés d'ensemble découlent essentiellement des possibilités d'interaction entre les différentes phases.

Ainsi toute modification de la *proportion*, de la *nature* et de l'*état* des phases en présence, engendre une influence sur l'arrangement des particules et se traduit par une modification des caractéristiques globales du système. De surcroît, le sol est donc un système dynamique. Sa teneur en eau est éminemment variable en tout point de la surface d'une parcelle et le départ d'eau s'accompagne de modification du volume apparent et en conséquence d'une réorganisation du matériau à différentes échelles (Tessier et Pedro, 1984).

## 1.2. Conséquences sur le comportement hydrique du sol

La structure d'un sol est le mode d'assemblage, à un moment donné, de ses constituants solides (Soltner, 2000). La structure résulte de processus de nature variée, biologique, chimique, physique et mécanique. La dominance de tel ou tel processus est à l'origine des divers types de structures. Dans ce cadre, le rôle des matières colloïdales est considérable.

Il s'agit des argiles en tout premier ordre et des autres matières tels que les oxyhydroxydes, les carbonates et les ciments organiques (Duchaufour, 2001)

Les argiles et les composés humiques en tant que colloïdes électronégatifs représentent la fraction essentielle des ciments dans les sols. Ils sont à l'origine des structures résultant des changements de volume liés aux phénomènes de gonflement-retrait.

La porosité est définie à l'intérieur des sols comme étant de deux grands types :

- **la porosité de remplissage** inter-grains des éléments grossiers dont la taille est supérieure à environ 1  $\mu\text{m}$ . Cette porosité joue un rôle relativement passif, car elle se vide et se remplit en fonction de la variation de la succion, mais ne joue aucun rôle dans la dynamique du système solide-liquide-solution.

- **la porosité de retrait-gonflement** est essentiellement variable et correspond à celle de l'arrangement des seules particules argileuses. La taille des pores est alors aux faibles contraintes égale ou inférieure à 1  $\mu\text{m}$  et diminue progressivement au fur et à mesure que l'on extrait de l'eau. Ce type de porosité est caractéristique des systèmes eau-argile ; il se trouve donc à l'origine de l'ensemble des propriétés qui fondent que les argiles sont des constituants tout à fait particuliers dans les sols.

Les résultats obtenus par Tessier et Pédro (1984) sur les grands types d'argile montrent que le volume minimal d'un matériau dépend avant tout de la possibilité d'acquiescer lors de la dessiccation un meilleur parallélisme au niveau de l'arrangement des particules argileuses. De ce fait, ce sont les matériaux argileux qui possèdent les particules les plus grossières et les plus rigides qui présentent le désordre le plus important et donc le volume minimal le plus élevé (Kaolinite). En revanche, dans les smectites, le parallélisme acquis lors de la dessiccation est tel qu'on arrive pratiquement au volume théorique minimal, compte tenu de l'espace interfoliaire.

Les considérations précédentes ne concernent naturellement que les matériaux argileux purs et homogènes, néanmoins, à la suite des travaux de Camara (1982), il s'avère que la présence d'une petite quantité de smectite suffit à augmenter très largement les propriétés de gonflement d'un mélange. Par ailleurs, les recherches de Fies (1971), Faure (1978), Stengel (1981) et Chrétien (1986) montrent que l'évolution d'un matériau hétérogène dépend non seulement de la nature des constituants, mais encore de la granulométrie des particules non argileuses. Dans le même sens, il existe actuellement plusieurs modèles qui décrivent suffisamment le gonflement des sols très gonflants, mais leur application à des sols modérément gonflants a été très peu étudiée (Jayawardane et Greacen, 1987).

Suivant que l'échantillon est humecté brutalement, c'est à dire soumis à de forts gradients de potentiel de l'eau (humectation d'un échantillon fortement séché au contact d'eau libre) ou bien que l'humectation est réalisée très progressivement, on aboutit à un matériau dont les caractéristiques peuvent être totalement différentes. La différence de l'état poral d'un matériau respectivement à l'état sec et à l'état humide, peut être décelé dans l'exemple de la figure 7, où, sous l'effet du phénomène de gonflement de l'argile, la densité apparente d'un échantillon de sol diminue linéairement suite à l'accroissement de la dose d'argile (Levy et *al.*, 2005).



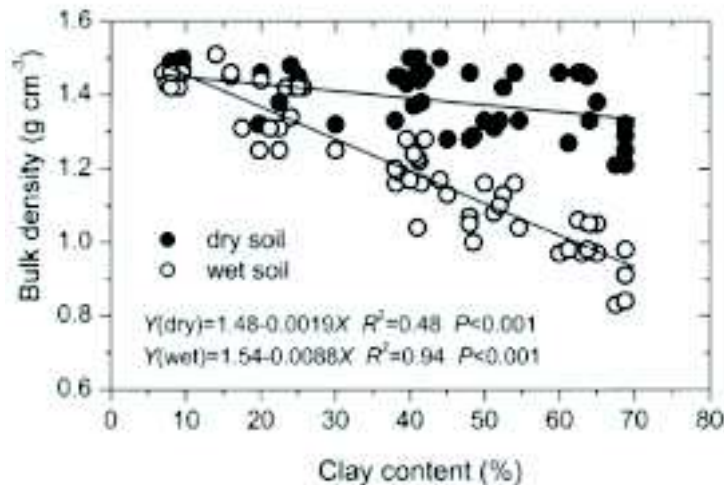


Fig. 6–Densité apparente d'échantillons de sol en colonne à l'état sec et à l'état humide en fonction de la dose d'argile (Levy et al., 2005)

### 1.3 Cas des sols arides

Les sols arides sont des terres qui sont soumises à un climat aride. Cette définition est tributaire de celles des termes *sol* et *aride*. Ils diffèrent de ceux des zones humides par cinq propriétés significatives toutes liées à une insuffisance en humidité (Cooke et al., 1993):

- altération faible et lessivage important, ils sont caractérisés par : une texture grossière, une faible couche superficielle (*shallow soil*), une faible rétention en substances solubles et une pédogenèse lente.

- grandes superficies d'affleurement des roches dénudées et un recouvrement en éléments grossiers décomposés.

- contribution majeure de la matière éolienne dans leur composition.

- forte réduction des surfaces cultivables comme conséquence à leur extrême vulnérabilité, effets de la pente, du drainage, de l'accumulation de sable d'origine éolienne et des faibles taux de matière organique.

- faible résistance aux processus de dégradation comparativement aux sols humides.

Les différentes formes de sols arides peuvent se présenter comme des sols sableux, légers, caillouteux, salés ou sous forme d'oasis, de playas et de dunes littorales.

**Les sols sableux** (*sandy soils*) se développent dans les régions arides et semi arides principalement suite aux processus communs d'altération en climat sec. Les facteurs qui interviennent dans ces processus peuvent être chimiques, biochimiques, mécaniques (libération de pression ou exfoliation), hydriques (cycle d'humectation-dessiccation) et thermique (insolation). Les roches et les graviers se décomposent en particules fines et l'action éolienne déplace sélectivement les particules d'argile et de vase loin de leur source sous forme de poussière - *la poussière saharienne et sahélienne d'Afrique constitue la majeure source de sédiments de l'océan atlantique* - (Haseltine, 2005). Les vieilles

superficielles ainsi érodées sont généralement le sable qui forme les plaines et les dunes. Les sols hérités des sédiments laissés par le vent ont des taux d'infiltration en eau élevés et sont caractérisés par une bonne capture des précipitations du fait de leur faible ruissellement de surface. Néanmoins, ils retiennent moins d'eau pour l'absorption des plantes comparativement aux textures fines. Les sols sableux posent d'autres difficultés pour la végétation en cas de vents forts étant donné qu'en phase de germination, les graines en semis sont généralement détruites par l'action éolienne du sable. La mobilité du sable et des dunes peut constituer une menace pour des périmètres irrigués et même des bâtiments, routes et pistes d'aérodromes (Balba, 1995).

**Les sols légers** (*thin soils*) sont la conséquence d'un ruissellement suite aux précipitations qui érode, en cas de pente, la couche superficielle du sol en la décapant progressivement. Superficiellement, ce type de sols perd l'eau de précipitation sous forme de ruissellement sitôt que l'eau retenue est rapidement évaporée. Ces sols minces fournissent un environnement dur pour la végétation, même ceux qui remplissent un rôle de protection contre l'érosion. Progressivement, la végétation présente sur ce type de sols se dégrade par décapage (Geneviève, 1994).

**Les sols caillouteux** (*Rocky soils*) nommés également chaussée de pierres ou *reg* présentent une surface consolidée par des fragments de pierres arrondis ou angulaires. En général, on rencontre uniquement une ou deux formes de pierres étalées sur une surface nue à cause de l'effet de l'érosion et celui de la migration ascendante des pierres. Le *reg* est un bon protecteur contre l'érosion éolienne, mais sa turbulence sous l'effet de l'action anthropique ou motorisée peut causer une accélération du processus érosif (Cooke et al., 1993).

**Les sols salés** (*Salty soils*) sont formés suite à la décomposition chimique des minéraux qui entraîne une accumulation de sels dans le profil. En fait, les faibles précipitations en climats aride et semi aride, sont insuffisantes pour évacuer les sels en dehors de la rhizosphère. Dès lors, les sels s'accumulent progressivement à la limite du front d'humectation. L'eau du sol et de l'atmosphère constitue d'autres sources de sels. Ces derniers peuvent s'accumuler sous forme d'une véritable couche dans le profil qu'il convient d'appeler calcique (*calcrete*) s'ils sont des sels de calcium, siliceuse (*silcrete*) s'ils sont des sels de silice ou gypseuse (*gypcrete*) s'ils sont des sels de gypse. A long terme, l'érosion expose très souvent, à la surface du sol, des couches cimentées qui apparaissent comme une roche. Plusieurs expositions calciques superficielles sont difficiles à distinguer des autres expositions calcaires ou marneuses. Le sel s'accumule également dans des cuvettes ou des playas suite au ruissellement des eaux de précipitation. Les étendues salées des sols arides posent des problèmes sévères à la production agricole et à la construction (Blackwell et al., 1990).

Dans certaines situations où le sol aride permet une infiltration rapide de l'eau et donc un bon lessivage des sels en profondeur, la salinité n'est pas contraignante. Ceci est tributaire de précipitations et de lessivage intenses. Ceci peut entraîner une acidification significative des sols, particulièrement quand les micros bassins, caractéristique typique des plaines sableuses, stockent l'essentiel de l'eau de ruissellement. Il peut résulter la présence d'*Alfisols* qui se développent dans les milieux microhumiques et des *Ultisols* dans les micros bassins, événement fréquent des plaines sablonneuses du Sahel d'Afrique. Les cuvettes fermées dans des déserts peuvent être dans certains cas salées, comme le cas de la cuvette de Ouargla dans le Sahara d'Algérie qui a un bassin biologique complexe entretenant dans son eau des niveaux de salinité variés (Abrahams et Parsons, 1994 ; Daoud et Halitim, 1994 ; Halilat, 1998).

**Les oasis et playas** (*sebkhas*) sont des zones arides où l'eau est une ressource particulièrement importante.

- Dans les oasis, on ne différencie pas entre les ressources en eau et les ressources en sols. C'est en fait l'une des données du développement durable profondément ancrée dans les valeurs culturelles de ces régions. Il s'agit de système d'exploitation où se nouent parfaitement le cultural et le culturel. Néanmoins, la compétition entre les activités de pâture agricole et celle de la faune est très aiguë dans ces superficies (Rouillois Brigol, 1973 ; Dubost, 1992).

- Les playas sont souvent très salés et peuvent accumuler les sels de l'eau de ruissellement et ceux des eaux profondes par capillarité. Deux problèmes majeurs d'aménagement associés aux playas sont la protection des fondations et la densité du trafic urbain (*traffic ability*). Ces problèmes sont causés par les inondations périodiques, la variabilité temporelle et spatiale de la compressibilité, l'effet corrosif des sels, la remontée des sels à la surface par capillarité et la forte densité de la matière de surface (Cooke et al., 1993).

## 1.4 Cas des sols littoraux

Les dunes littorales, constituent des sols dont les caractéristiques sont proches de celles des sols sableux arides. En effet, le littoral **méditerranéen**, est caractérisé par l'absence de marées, la présence de puissants vents antagonistes (*vents de terre et vents de mer*) et de formation de cordons sableux généralement de faibles volumes (Favenec, 1998).

A ce sujet, il est important de distinguer les dunes **continentales** des dunes **littorales**. Les premières sont caractéristiques des paysages désertiques. Leur forme varie en fonction de la force et de la direction des vents. Ces derniers, porteurs de particules de sable, déposent leur charge lors d'un ralentissement de leur vitesse. Si un obstacle (caillou, touffe d'herbe) provoque ce ralentissement en produisant des remous, le sable se dépose en amont et en aval de l'obstacle et l'enfouit sous un amas de forme aérodynamique qui ne suscite plus de remous.

Il s'agit, généralement, d'une dune d'obstacle de taille modeste (quelques décimètres). Dans les zones à déficit d'alimentation sableuse et où le vent souffle modérément dans une direction unique, il se forme des dunes en croissant ou barkhanes (Fig.8). Celles-ci, érodées sur leur versant amont en pente douce, réalimentées sur leur flanc aval en pente raide, progressent sans cesse.

En revanche, dans les régions riches en sable, où les vents dominants sont réguliers, se constituent d'immenses champs de dunes transversales à l'exemple des ergs du Sahara. Ces dunes sont presque immobiles, parallèles et séparées par de longs couloirs appelés gassis. Des vents irréguliers donnent aux dunes des formes complexes, sinueuses (*sifs*) ou en étoile, ou bien favorisent la formation de dunes secondaires (*ghourds*). Les dunes longitudinales sont de modestes accumulations de 1 à 2 m extrêmement allongées dans le sens d'un vent très violent (FAO, 1988).

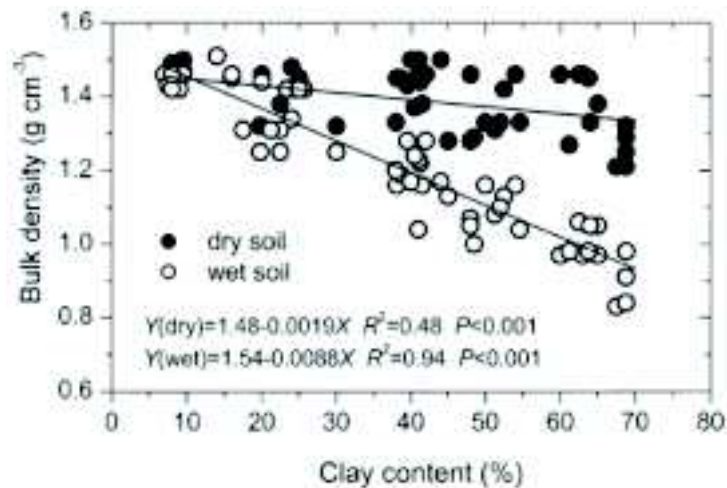


Fig. 7 – Profil d'une dune en croissant ou barkhane

Les **dunes littorales** résultent quant à elles de l'accumulation, par le vent, du sable. Sur la plage, selon la force du vent et l'alimentation en sable, elles forment des chaînes parallèles au rivage, ou s'organisent en croissant dont la concavité est tournée face au vent (Fig.9). Ces dernières sont dites paraboliques et peuvent se souder pour constituer des dunes en râteau.



Fig. 8 – Profil d'une dune de type parabolique

De telles formations, si elles ne sont pas retenues par la végétation, ont tendance à progresser à l'intérieur du continent. L'exemple de la côte aquitaine, en France, montre un cas où des dunes sont définitivement fixées par l'implantation d'un tapis herbacé composé d'oyat (*Ammophila arenaria*) et de pins maritimes (Miossec, 1990).

En Algérie, la zone littorale est constituée de plaines, de plateaux, d'ensembles collinaires et d'escarpements où s'inscrivent des échancrures s'ouvrant souvent en forme de baies comme dans le cas des principales villes portuaires. On rencontre souvent des formations dunaires de type calibré qui dégage un plateau sablonneux le long de la côte sous l'effet de vents réguliers (Fig.10). Ceci peut être lié à l'activité du tertiaire et les formations quaternaires qui ont marqué la morphogenèse littorale (Gourninard, 1958). Si nous considérons la région de Mostaganem (Nord-Ouest d'Algérie), sommairement, sa géomorphologie côtière est dominée par trois principales origines (Mederbal, 1983 ; Benest, 1985) :

Origine continentale étant donné que le plateau de Mostaganem est recouvert d'un manteau gréso-calcaire reposant sur des marnes du pliocène.

Origine marine vu que l'action des vagues sur le continent désagrège les roches et le sable s'accumule sur les plages.

Origine fluviatile par la présence de nombreux oueds potentiellement capable d'entraîner des apports fluviatiles remaniés par les vagues puis rejetés sur le continent.

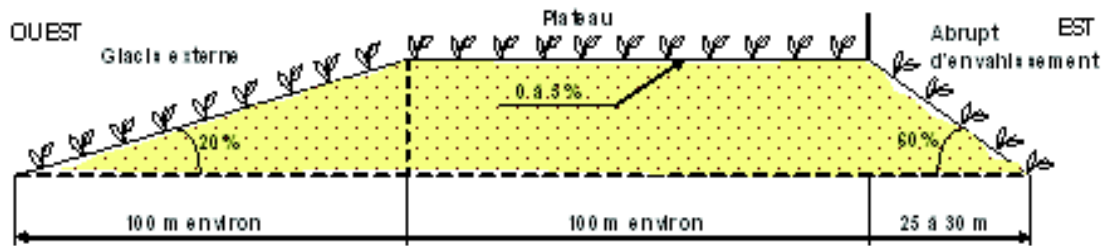


Fig. 9 – Profil d'une dune de type calibré

La combinaison de ces facteurs morphogénétiques engendre les principales formes et formations dunaires actuelles. Une certaine morpho-diversité des côtes Algériennes caractérise ces milieux littoraux. Sur le flanc Ouest, des ensembles sableux se situent entre Mostaganem et Ténès et cumulent plus d'une cinquantaine de kilomètres de linéaire côtier où le transport éolien est très actif. En revanche, la zone littorale présente une vulnérabilité évidente car elle est très convoitée. De ce fait, et en plus du fait qu'elle est soumise à l'effet érosif, elle subit de nombreuses contraintes liées à la grande concentration urbaine qui menacent autant ses ressources naturelles que ses équilibres écologiques fondamentaux.

## 1.5 Contraintes abiotiques de salinité et de sodicité

Dans les zones arides et semi-arides, l'eau est le principal facteur limitant de la production agricole. La demande alimentaire n'y cesse de croître, du fait de la forte pression démographique et contraint les agriculteurs à recourir à l'irrigation comme nécessité indéniable pour la production agricole et aussi à utiliser des terres marginales dont certaines sont souvent à risque de salinisation imminente. Pas moins de 35 à 40 % de la nourriture produite dans le monde provient de 15 % des terres arables cultivées en irrigué. Les prévisions démographiques mondiales durant les trois prochaines décennies exigent une augmentation d'au moins 20 % de la production agricole dans les pays développés et 60 % dans les pays en développement pour maintenir les niveaux de consommation alimentaire actuels (Lahlou *et al.*, 2002 ; Filali, 2004).

Cependant, l'irrigation mal contrôlée engendre des dégradations importantes de la qualité des sols et des eaux phréatiques. En effet, aussi bien la quantité d'eau d'irrigation que sa qualité affectent fondamentalement le sol et les espèces cultivées. La présence de sels solubles dans l'eau et le pouvoir évaporateur de l'air en zones irriguées conduisent potentiellement à la salinisation des sols, en particulier, ceux des régions arides et semi-arides. On différencie, en règle générale, entre la salinisation primaire, liée à une présence naturelle relativement élevée de sels (roche mère salée, nappe phréatique salée, proximité des mers ou des océans, présence de dépôts de sels...), et la salinisation secondaire, dont le développement est lié à la conduite de l'irrigation. Comme le montre la figure 11, la salinisation secondaire est un processus de dégradation de la qualité des sols et des eaux qui se manifeste lorsque les eaux de drainage ou de la nappe phréatique sont recyclées. En effet, la salinisation secondaire est la forme de dégradation la plus rapide dans les périmètres irrigués (Mathieu et Ruellan, 1980; Brun et Wacquand, 1981; Robert, 1992; Szabolcs, 1993 et Lahlou *et al.*, 2002).

La contamination a, d'ores et déjà, touché quinze millions d'hectares de terres agricoles dans les seuls pays d'Afrique du nord et du Moyen-Orient (Benahmed et al., 1996). En Algérie, le pourcentage des terres irriguées atteintes par la salinisation est significatif, il compte près de 10 à 15% de la superficie totale des périmètres irrigués (Cheverry et Robert, 1998).

En réalité, la salinisation d'une parcelle irriguée ne dépend pas uniquement de la qualité de l'eau d'irrigation et des propriétés du sol mais également des conditions climatiques et du niveau de la nappe phréatique. Chacun de ces facteurs fait intervenir un certain nombre de paramètres qui font que le nombre total de données afférentes au processus de salinisation est si important que l'appréhension du phénomène devient, en toute vraisemblance, complexe.



Fig. 10– *Processus de dégradation de la qualité des sols suite à l'irrigation (Lahlou et al., 2002)*

De plus, il faut noter qu'en Algérie, les eaux d'irrigation sont relativement chargées, particulièrement dans le Sahara et les plantes cultivées n'extraient que très peu de sels, si bien que de grandes quantités s'y accumulent dans la rhizosphère (Daoud et Halitim, 1994; Levigneron et al., 1995 ; Lahlou et al., 2002). Ce processus est accéléré par la forte évaporation qui caractérise les régions arides et semi arides (Fig.12). Globalement, la présence de sels dans le profil d'un sol peut entraîner trois grands types de contraintes abiotiques qui sont : la *salinité*, la *sodicité* et la *toxicité*.

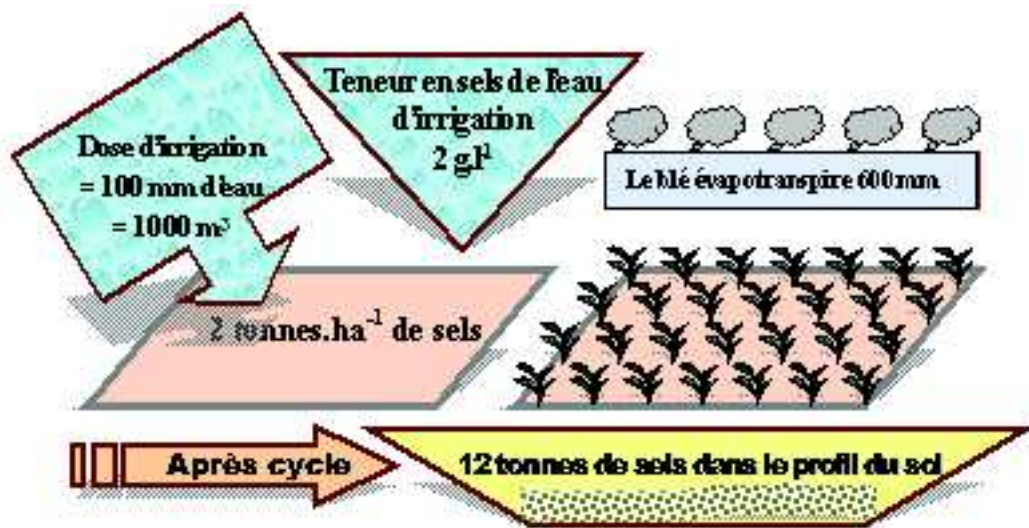


Fig. 11 – Exemple illustrant le phénomène rapide de salinisation comme conséquence de l'irrigation (Daoud et Halitim, 1994)

**La salinité** fait référence à la concentration totale des sels dissous dans le sol ou dans l'eau. Un sol est dit salé si la conductivité électrique de son extrait de pâte saturée est supérieure ou égale à  $4 \text{ dS.m}^{-1}$  à  $25 \text{ °C}$  (Boulaine, 1981). Les sols salins contiennent souvent, suffisamment de sels solubles (au moins 1 à 3 ‰ de NaCl respectivement en surface et en subsurface du sol) pour inhiber la croissance des plantes par stress osmotique (Northcote et Skene, 1972). Les conséquences de la salinité sont une réduction de la croissance du végétal et donc une chute du rendement étant donné que la plante dépense une partie importante de son énergie à extraire l'eau avec une concentration acceptable pour son développement à partir de la solution de sol salée. Cette dépense d'énergie supplémentaire correspond à ce qu'on appelle couramment le "stress osmotique". Ce phénomène est semblable à celui rencontré par la plante dans des conditions de stress hydrique.

**La sodicité** est, en revanche, liée à une forte présence en sodium, qui détériore les propriétés structurales du sol et réduit la circulation d'eau dans son profil. Comme pour la sécheresse, en présence de salinité, des proportions excessives en sodium, par rapport au calcium et au magnésium, réduisent l'eau disponible pour la plante.

Quand à **la toxicité**, elle fait référence à l'effet spécifique d'un élément ou un sel donné tel que le chlorure, le bore, le sodium ou d'autres oligo-éléments dont l'effet toxique s'exprime à des seuils relativement bas pour certaines espèces végétales. Les espèces arbustives et forestières sont fréquemment sensibles à ces éléments potentiellement toxiques et dont les seuils de toxicité et de carence sont parfois très proches (Boulaine, 1981 ; Levigneron et al., 1995 ; Benyahia et al., 2004). Par ailleurs, on évoque l'effet spécifique du Mg dont la toxicité serait plus élevée que celle du Na à même concentration en milieux salins continentaux en général et au Maghreb particulièrement (Rengasamy et Olsson, 1993 ; Cheverry et Robert, 1993; Daoud et Halitim, 1994).

Pour un diagnostic adéquat de l'état de contamination d'une parcelle agricole, la salinité, la sodicité et la toxicité doivent être évaluées. Normalement, les risques de contamination sont dus, soit à l'eau d'irrigation, soit à la présence d'une nappe peu profonde. Dans le cas où une présence de sels dans le profil du sol est suspectée, des échantillons représentatifs

de l'eau d'irrigation, de celle de la nappe et du sol dans la rhizosphère sont à analyser en vue d'éviter ou au moins minimiser les risques de contaminations (Gupta et Abrol, 1990).

Northcote et Skene (1972), définissent comme sodique, un sol contenant suffisamment de  $\text{Na}^+$  échangeable pour perturber la croissance de la plupart des cultures. Dans ce cas, le seuil minimum de sodicité des sols correspond à 6% de sodium échangeable (ESP) dans le mètre supérieur du profil de sol. Une autre approche, présente le caractère sodique d'un sol par une valeur de l'EPS supérieur à 15 % pour les horizons A et/ou B (Boulaine, 1981). Néanmoins, la dispersion de l'argile peut déjà avoir lieu à des valeurs bien plus faibles que ces seuils, selon que c'est le  $\text{Mg}^{++}$  ou le  $\text{Ca}^{++}$  qui domine le complexe argilo-humique (Sposito et al., 1983). C'est pratiquement, le rapport entre la salinité du sol et son rôle flocculant d'une part et la sodicité et son effet dispersant d'autre part, qui réglera l'état d'agrégation du sol qui gardera en conséquence sa structure ou dispersera en fonction des variations de ce rapport. La dispersion compacte le sol et affecte son infiltration de sorte que la croissance et le développement des plantes deviennent difficiles. Les principales répercussions associées à la chute de l'infiltration du sol, sont la réduction de l'eau disponible pour la plante et le renforcement du ruissellement qui peut favoriser le processus d'érosion. Dans ce cas, la couche superficielle du sol gonfle et l'eau y réside en créant un milieu anaérobie défavorable à la croissance et au développement des plantes ainsi qu'à la décomposition de la matière organique. La réduction de la décomposition de la matière organique constitue un facteur pertinent de diminution de la fertilité du sol (Scherr Sara et Yadav, 1997).

Le renforcement de l'érosion, suite à la destruction de la structure du sol liée à la sodicité, affecte souvent les eaux aquifères par ruissellement en aval (Northcote et Skene, 1972 ; Oster et Shainberg, 1991). C'est, en fait, le contact entre le sol affecté et l'eau de pluie (effet « splash »), qui favorise le ruissellement érosif superficiel vers les nappes aquifères, à partir desquelles l'eau, de nouveau repompée, est injectée par irrigation à d'autres parcelles. Il en résulte ainsi, une augmentation de l'échelle de contamination dont les diverses formes de dégradation environnementale sont le produit d'interactions entre les sols infectés, la concentration actuelle des sels solubles et de sodium ainsi que le mode de distribution spatiale et temporelle de l'écoulement d'eau. D'autres facteurs d'influence sur le SAR de la solution du sol, tels que le climat, le type de sol, l'espèce et la variété végétale et les méthodes d'aménagement doivent être aussi pris en compte (Fig.13). Les précipitations jouent un rôle non négligeable dans la relation entre la salinité, la sodicité et les propriétés physiques du sol. Des précipitations intenses peuvent évacuer les sels en dehors de la rhizosphère, mais souvent, ne permettent pas de réduire de manière significative la quantité de sodium fixée dans le sol. Cependant, des précipitations très importantes peuvent réduire le pouvoir d'agrégation du sol dû à la salinité et donc augmenter les risques de dispersion par le sodium échangeable.



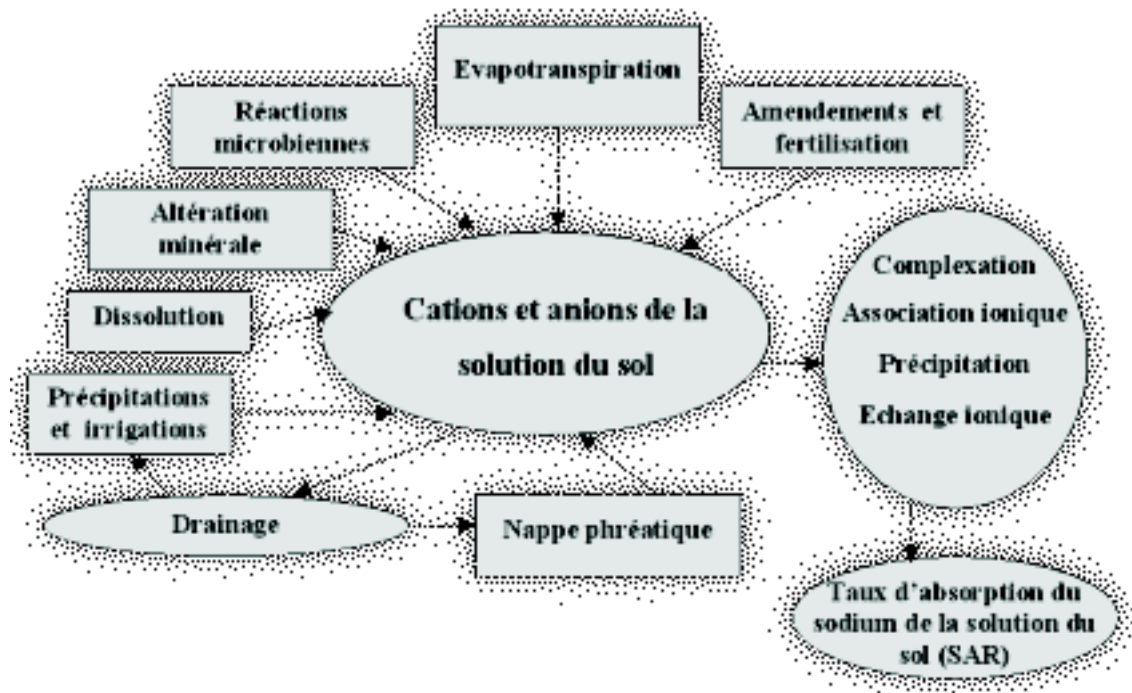


Fig. 12– Facteurs d'influence de la solution du sol sur le SAR (d'après Rengasamy et Olsson, 1993)

Le tableau 4 montre les réductions du taux d'infiltration en fonction de la qualité d'une eau d'irrigation. Cette approche permet d'estimer les effets de la salinité (CE) et de la sodicité (pourcentage de sodium échangeable, ESP) de l'eau d'irrigation sur les propriétés physiques du sol. En effet, il est connu, que le grand problème posé par la dispersion des colloïdes liée à l'ion sodium est la chute de l'infiltration et de la conductivité hydraulique du sol ainsi que son encroûtement superficiel suite aux cycles de dessiccation-humectation (Levyet *al.*, 1999).

SAR	CE (dS.m <sup>-1</sup> )		
	Bonne infiltration	Infiltration faible à moyenne	Très faible infiltration
0 à 3	> 0,90	0,90 à 0,20	< 0,20
3 à 6	> 1,30	1,30 à 0,25	< 0,25
6 à 12	> 2,00	2,00 à 0,35	< 0,35
12 à 20	> 3,10	3,10 à 0,90	< 0,90
>20	> 5,60	5,60 à 1,80	< 1,80

Tableau 4 – Réduction du taux d'infiltration en fonction de la salinité et la sodicité de l'eau d'irrigation (d'après Ayers et Tanji, 1981)

## 1.6 Conductivité hydraulique

L'état de dispersion du sol ne réduit pas uniquement l'infiltration de l'eau dans le sol mais affecte également sa conductivité hydraulique. En effet, la conductivité hydraulique n'est pas exclusivement une propriété du sol, puisqu'elle dépend à la fois des caractéristiques du

sol et du fluide. Les caractéristiques du sol qui influencent la conductivité hydraulique sont la porosité totale, la distribution de la taille des pores et la tortuosité et celles du fluide qui influencent ce paramètre sont la densité et la viscosité (Hillel, 1974). En cas de contraintes de salinité et de sodicité, toutes ces caractéristiques liées au sol et à l'eau sont affectées. C'est pourquoi, on assiste ces dernières années, à des explications des manifestations liées aux phénomènes d'humectation dessiccation et de gonflement-retrait de matériaux soumis à la salinité/sodicité, focalisées sur l'interprétation de leurs conductivités hydrauliques. En effet, durant l'hydratation du milieu, la fraction du volume associée à l'hydratation osmotique est habituellement plusieurs fois plus grande que celle liée à l'hydratation de surface en relation avec le type d'argile, les cations échangeables et la teneur en eau du milieu (Frenkel et al., 1978). D'emblée, le comportement hydrique et la conductivité hydraulique sont incontestablement, les deux propriétés hydrauliques fondamentales d'un sol soumis aux contraintes abiotiques de salinité et sodicité.

Des études rapportent la relation qui permet de corréliser la conductivité hydraulique avec la teneur en eau d'un sol (Ahuja et Williams, 1991 ; Jayawardane, 1992 ; Williams et Ahuja, 1994). Ces travaux ont permis de développer des équations de régression en se basant sur les fractions granulométriques, la teneur en matière organique et la densité apparente en vue de prédire la rétention en eau du sol à 12 potentiels matriciels variant de -4 à -1500 kPa. Par ailleurs et pour un sol donné, il existe une autre relation linéaire entre la conductivité hydraulique saturée et la pression de succion (potentiel matriciel entre 0 et -1500 kPa). Ceci est conforme au modèle de Gregson-Hector-McGowan qui montre qu'il est possible de modéliser la variabilité spatiale du potentiel matriciel  $\psi(q)$  et de la conductivité hydraulique  $CH(\psi)$  ( $\psi$  = potentiel matriciel ;  $CH$  = conductivité hydraulique et  $q$  = teneur en eau volumique). Ce qui permet (Lessard et al., 1985 ; Ahuja et Williams, 1991):

de déterminer  $CH(\psi)$  de différents sols d'horizons divers,

d'étendre les résultats de l'étude des données d'un sol à nombreux autres sols par la connaissance uniquement de leurs densités apparentes et de leurs teneurs en eau à -33 kPa et éventuellement de leurs infiltrations au champ,

de caractériser les distributions spatiales de  $CH(\psi)$  dans de grandes superficies avec le minimum de mesures.

Il est admis que la diminution de la conductivité hydraulique d'un sol est liée à l'accroissement du pourcentage de sodium échangeable (ESP) et à la diminution de la concentration de l'électrolyte dus au gonflement de l'argile et/ou à sa dispersion (Pupisky et Shainberg, 1979 ; Keren et al., 1988 et 2003 ; Mizoguchi et Shibata, 1995).

## 1.7 Indicateur biologique : la tomate

La tomate est le légume le plus consommé dans le monde avec près de 85 millions de tonnes par an. Ce chiffre a doublé pendant les 25 dernières années (Locascio et Smajstrla, 1995 ; Amitom, 1998). Cette progression s'accélère suite aux prévisions de la recherche médicale qui confirme de plus en plus, les constatations initiales sur les propriétés bénéfiques des antioxydants de la tomate en matière de prévention contre le cancer et les maladies cardiovasculaires (Archana et al., 2002).

La production actuelle annuelle moyenne de tomate fraîche dans le monde s'élève approximativement à 100 millions de tonnes. En comparaison avec la pomme de terre et le

riz, cette production est respectivement multipliée par 3 et 6. Cependant, plus de son quart est orienté vers l'industrie de transformation avec plus de 27 millions de tonnes traitées chaque année dans les unités des grandes marques de l'industrie agroalimentaire mondiale (Anonyme, 2004).

En Algérie, la consommation annuelle en double concentré de tomate est estimée à près de 80 000 tonnes malgré que potentiellement, les capacités de transformation soient de l'ordre de 140 000 tonnes. Le manque de mesures incitatives à la production de la tomate industrielle et les taxes élevées imposées aux producteurs, font que presque 85% des surfaces cultivées ne sont pas irriguées. La production est de ce fait affectée (Tableau 5) et comme conséquence, les quantités importées de pâte de tomate passent brusquement de 2600 tonnes en 2001 à

Tableau 5 – Production de la tomate en Algérie (d'après Tomato news, 2006)

38100 tonnes en 2004, ce qui représente une augmentation de plus de 1300% (Tomato news, 2006).

La production de tomate destinée à la transformation se situe principalement au Nord-Est du pays (Fig.14), dans les régions d'El Tarf, d'Annaba, de Guelma, de Skikda et de Jijel qui représentent près de 85% des surfaces totales de production, les 7 et 3 % qui restent sont situées respectivement au centre et à l'ouest du pays (Tomato news, 2006).

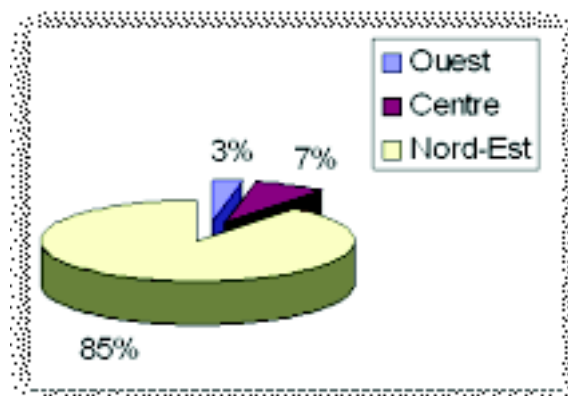


Fig. 13 – Répartition des surfaces de production de la tomate industrielle en Algérie (d'après Tomato news, 2006)

La conduite en sec et l'absence de mécanisation expliquent d'une part, la répartition des surfaces de production à travers le pays étant donné que l'importance des précipitations augmente de l'Ouest à l'Est et d'autre part la faiblesse des rendements enregistrés qui est faible par rapport à la moyenne mondiale: 40 à 120 T.ha<sup>-1</sup> (Skiredj, 2005). Nous constatons, finalement, que l'eau et les mesures incitatives sont les facteurs limitant de la production de tomate industrielle en Algérie au profit de l'accroissement de la part d'importation de ce produit. En effet, il est connu que parmi les facteurs de l'environnement qui déterminent l'expression génétique de cette espèce tels que l'éclairement, la température, la salinité et l'approvisionnement en eau, ces deux derniers sont de loin, les principaux facteurs limitant sa croissance et son développement dans les régions arides et semi-arides (Damidaux et Latterot, 1989). A une échelle plus grande, la salinité représente l'une des raisons majeures des faibles rendements et du manque de qualité chez cette espèce (Sonneveld, 1988; Mitchell et al., 1991; Katerji et al., 2000). En effet, la tomate est souvent cultivée dans des pays à climat sec et chaud où les sols salés couvrent de grandes surfaces, ce qui pose le problème de son adaptation à la salinité pour l'extension des surfaces cultivées.

Dans les régions à climat méditerranéen, le problème de la salinité est accentué par la présence de concentrations élevées en chlorure de sodium dans les eaux d'irrigation. Cette espèce végétale sélectionnée sous son climat idéal en Californie, a rapidement montré des défauts en matière de précocité, de qualités technologiques et de sensibilité aux maladies à cause probablement du fait qu'elle soit exacerbée sous d'autres climats (Damidaux et Latterot, 1989).

En milieu salé, les éléments accumulés dans le sol peuvent limiter ou même stopper la croissance du végétal. Cette action inhibitrice est essentiellement liée à l'élévation de la pression osmotique de la solution de sol et à l'augmentation de sa concentration saline. La toxicité éventuelle spécifique de certains ions vient s'ajouter aux effets de déséquilibre osmotique (Shannon et Grieve, 1999). Dans ce contexte, la sélection de variétés adaptées à la salinité nécessite la connaissance des mécanismes responsables de sa tolérance aux différents sels. Il n'en demeure pas moins, que la recherche de la variabilité génétique chez la tomate a mis en évidence des variétés dont la nutrition minérale en milieu peu salé entraîne une meilleure expression des potentialités productives de la plante qu'en milieu sain (Lakhdari, 1986 ; Mizrahi et al., 1988 ; Mitchell et al., 1991 ; Cornillon et Augé, 1995).

Les données quantitatives sur la tolérance à la salinité des espèces végétales sont nécessaires pour l'établissement d'une échelle de sensibilité des cultures à la salinité compte tenu des conditions de l'environnement, des pratiques culturales et principalement de l'évolution de l'humidité et de la salinité dans la rhizosphère (Shannon et Grieve, 1999). Néanmoins, il est sans doute plus indispensable de lutter contre la dégradation des sols liée aux contraintes de sécheresse et de salinité/sodicité en mettant en valeur les sols arides et semi arides (Robert et Cheverry, 1996).

Pour étudier les effets de la salinité sur la levée et le développement précoce de jeunes plants de tournesol et de maïs plantés sur des pots remplis d'argile sableuse et de limon sableux, Katerji<sup>2</sup> (1994) a constaté qu'au stade juvénile, les cultures sont affectées plus significativement par la salinité que par la différence de texture entre les deux substrats. En outre, à des stades plus avancés, l'effet de la salinité sur la réduction de la morphologie des plants est relativement similaire, mais ceux installés dans le limon sableux semblent plus affectés par le stress hydrique que ceux installés dans l'argile sableuse. On en déduit qu'une plante soumise à des contraintes abiotiques de sécheresse ou de salinité ne peut subir de manière systématique les effets de celles-ci sans pour autant subir l'influence du substrat en tant que milieu physique siège de l'interface plante-eau. Il est néanmoins important, de noter que les effets relatifs des traitements salins et du substrat varient d'un stade de développement à un autre. A ce sujet, plusieurs études indiquent que la tolérance des cultures au stress salin et leurs rendements dépendent du stade de développement et de la durée pendant laquelle est appliqué le stress (Dumbroff et Cooper, 1974 ; Maas et al., 1986 ; Van Hoorn et al., 1993).

Les processus impliqués dans l'élaboration du rendement d'une culture sont influencés par l'interaction des facteurs environnementaux et des facteurs génétiques (intrinsèques à la plante). Les contraintes environnementales affectant une culture peuvent occasionner des pertes de rendement considérables, parmi lesquelles, il est possible de distinguer : le stress ionique, lié à la carence ou la toxicité en certains éléments minéraux du sol et le stress hydrique lié aux humidités relatives du sol et le stress thermique lié aux hautes et basses températures (Monneveux et This, 1997). Alors que le stress lié à la composition minérale des sols peut facilement être caractérisé et est relativement contrôlable, il apparaît plus difficile de décrire, prévoir et contrôler les stress hydrique et thermique. En réalité, les contraintes environnementales subies par la plante associent, le plus souvent, plusieurs

types de stress. Dans le cas des zones arides et semi-arides, ils se manifestent par l'interaction de l'aridité (stress hydrique et thermique) et de la salinité (pression osmotique ; toxicité des ions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$  et  $\text{Cl}^-$ ). Le stress hydrique occupe toutefois une place très particulière du fait de sa fréquence d'occurrence et de la place que l'eau occupe dans les phénomènes métaboliques (Monneveux et This, 1997). Le plus à subir ce stress, sont les sols à texture sableuse qui se développent principalement dans ces régions suite à des processus d'altération caractéristiques des climats arides (Le Bissonnais, 1996 ; Le Houerou, 2000)

Il est utile de rappeler que le rôle de la tomate dans le cadre de cette étude, est celui d'un bio-indicateur de l'état de contamination du système substrat-plante par des contraintes abiotiques (salinité et sodicité). En effet, les préférences en types de sol pour cette espèce, sont très larges. Le sol doit être bien aéré et drainant mais l'asphyxie racinaire, même temporaire, risque d'être préjudiciable pour la culture. La teneur en matière organique du sol doit varier entre 2 et 3 % pour obtenir de bons rendements. Le pH optimal du sol est de 5,5 à 6,8 mais la culture tolère une large gamme de pH allant de 7 à 8,5. La culture tolère une conductivité électrique qui ne dépasse pas de 3 à 3,5  $\text{dS.m}^{-1}$  et répond bien à un apport de calcium pour l'amélioration de la qualité de son fruit. En revanche, une carence en zinc entraîne une anomalie de nanisme de la plante (Skiredj, 2005 ). Ces exigences font de la tomate un bio-indicateur idéal du substrat où elle se développe, quand ce dernier est sableux. De ce fait, le comportement de la culture peut dans une large mesure, mettre en relief les effets liés aux éventuelles contraintes abiotiques.

Les mécanismes d'adaptation de la culture à la salinité sont globalement divisés en trois grandes formes :

### 1.7.1 Sélectivité

---

Le phénomène de rétention sélective chez la plante étudié sur une espèce halophyte (*Aninnia marina*) stressée à différentes concentrations de NaCl, montre pour la concentration de 100 millimoles, une nette augmentation du taux d'absorption en potassium (PAR) par rapport au témoin, alors qu'il demeure constant pour la concentration de 500 mM (Rains et Emanuel, 1967). La forme du sodium sous forme d'ion  $\text{Na}^+$  ou sous forme de sel NaCl semble influencer sur l'arrêt de l'absorption du  $\text{K}^+$  par les racines (Lessani et Marschner, 1977 ; Hajji et Grignon, 1985).

D'autres études montrent que les espèces les plus résistantes arrivent à limiter l'accumulation du sodium dans les racines soit en réfrénant son entrée (Wacquand, 1995) ou en l'éliminant partiellement (Pitman, 1976; Smith et Middleton, 1980). Les glycophytes plutôt sensibles laissent pénétrer ce cation au détriment du potassium (Levitt, 1980 ).

L'accumulation du  $\text{Na}^+$  dans les tiges ou les racines ou encore dans les feuilles se manifeste par l'existence de sites de fortes affinités pour le sodium en particulier au niveau membranaire grâce à la présence et à l'action possible du  $\text{Ca}^{++}$  (Lazof et Cheeseman, 1986 ; Ward et al., 1986).

### 1.7.2 Exclusion

---

L'exclusion foliaire du  $\text{Na}^+$  chez les glycophytes sensibles comme le haricot se retrouve aussi chez les glycophytes résistantes comme le laurier rose (Hajji et Grignon, 1985) ou la luzerne (Brun et Wacquant, 1981). Le mécanisme d'exclusion du sodium est étudié depuis longtemps sur le tournesol, le haricot (Jacoby, 1966) et le maïs (Yeo et al., 1977). Le génotype résistant recèle la faculté d'exclure le sel par les feuilles (Bottacin et al., 1984; Slama<sup>2</sup>, 1986). Belkhodja (1996) remarqua chez la fève, la migration du sodium vers les tiges et les feuilles pour se localiser à des teneurs d'autant plus élevées que l'absorption du  $\text{K}^+$  diminue sans être inhibée dans les milieux les plus concentrés. La plante empêche le sel de remonter jusqu'aux feuilles. Une première barrière 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.

### 1.7.3 Excrétion

---

Elle se fait par les glandes et les poils vésiculeux, elle est propre aux halophytes, permet le maintien d'une concentration constante de sel dans les cellules foliaires grâce à un mécanisme actif de transport contre un gradient de concentration. A cet effet, la plante 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, le sel est alors stocké dans les vacuoles grâce à des systèmes de "pompes" moléculaires. Les vacuoles sont des compartiments fermés au sein de la cellule. Le sel est ainsi isolé des constituants cellulaires vitaux (Hagemeyer, 1999).

Des travaux récents prospectent l'existence d'un nouveau mécanisme de tolérance au sel. En effet, la plante protège ses feuilles, donc sa capacité de photosynthèse, en réexportant le sodium des feuilles vers les racines par le flux de sève descendant, de façon à rendre possible une ré-excrétion dans le sol. Ces recherches ont permis d'identifier le gène à l'origine du transport du sodium des feuilles vers les racines chez *Arabidopsis thaliana*, considérée à ce titre, comme espèce modèle. La modification de ce gène affecte fortement la résistance de la plante au sel. Il est donc raisonnable de penser que l'on pourra renforcer cette résistance en augmentant l'expression de ce gène (Berthomieu et al., 2003 et Calu, 2006).

Pour conclure ce chapitre sur l'étude bibliographique, il est possible de noter les remarques suivantes :

Dans les régions arides, semi arides et littorales, les sols sableux se caractérisent par des propriétés défavorables à la production agricole qui les rendent vulnérables à la dégradation par érosion et sous les effets des contraintes abiotiques de salinité et de sodicité. Le recours à l'amendement argileux est l'une des voies envisagées pour améliorer les propriétés physiques de ces sols particulièrement quand un gisement à base d'argile est disponible à leur proximité comme c'est le cas du plateau de Mostaganem, comme nous allons le voir dans le chapitre suivant. Cette alternative s'avère intéressante dans la mesure où le gisement qui se trouve à Mostaganem est à base d'une bentonite connue pour ses grandes propriétés d'hydratation et ses diverses applications industrielles. Il s'agit dans ce cas, de donner les bases scientifiques qui permettraient son usage agricole pour la bonification des sols sableux dans le plateau de Mostaganem en particulier et dans les

régions arides et semi arides d'Algérie en général. Cette approche apparaît importante pour au moins deux raisons :

la première est qu'elle permet dans une large mesure d'améliorer les propriétés physiques des sols sableux dans le sens de protéger le plateau contre la dégradation physique.

la seconde est liée au développement de la production agricole pour l'autosuffisance d'une population sans cesse galopante dans la région qui ne peut compter que sur le développement d'une agriculture irriguée et toutes les contraintes qu'elle peut engendrer en matière de salinisation secondaire.

# Chapitre II Caractérisation des matériaux d'étude : sables et argiles

## Introduction

Le sol est un système complexe. Sa matrice est constituée de particules de compositions chimique et minéralogique différentes ainsi que de taille, forme et orientation variées. L'agencement ou l'organisation de ces particules dans le sol détermine les caractéristiques de l'espace poral dans lequel l'eau et l'air transitent ou sont retenus.

Le sol est toujours constitué de deux fractions d'importances massiques très variables à savoir le squelette et le plasma. Le squelette est constitué de particules grossières de sable et de limon souvent considérées inertes du point de vue chimique et physique à cause de leur forme rigide et leur structure massive (Lesturgez, 2005). Il enregistre une capacité de rétention en eau et en éléments minéraux limitée et forme donc un ensemble défavorable à la production agricole.

C'est la fraction argileuse ou plasma qui détermine de manière décisive les divers comportements du sol puisqu'elle développe la surface spécifique la plus grande et est par conséquent la plus active dans les processus physico-chimiques. La fraction argileuse diffère donc aussi bien minéralogiquement que dimensionnellement des sables et limons qui sont composés principalement de quartz et d'autres particules minérales primaires qui n'ont pas été transformées chimiquement en minéraux secondaires, à contrario de l'argile (Hillel, 1974).

Les différents minéraux argileux diffèrent également en propriétés et en proportion. Ils ont fait l'objet de nombreuses recherches, eu égard à leurs applications industrielles variées : céramiques, pétrochimiques, mécaniques, génie-civiles, pharmaceutiques et environnementales (Stengel et Gelin, 1998). Alors que l'étude de la texture donne une idée de la quantité d'argile dans le sol, elle renseigne très peu sur le caractère spécifique et sur l'activité de l'argile. Dans ce cadre, il est déjà difficile, à l'aide des seuls rayons X, de déterminer la composition cristallographique qui s'exprime dans une formule structurale. Il faudrait connaître, pour la détermination des argiles d'un sol, non seulement le type de structure, mais également la composition chimique du minéral et celles des impuretés qui l'accompagnent (Robert, 1975). Les progrès récents accomplis en science du sol rendent de plus en plus indispensable la connaissance fine des minéraux argileux constituant la fraction minérale des sols.

La dégradation des sols dans le monde, touche près de 2 milliards d'hectares (Scherr Sara et Yadav, 1997). Elle affecte essentiellement les sols sableux du fait de l'ampleur des dégâts occasionnés par l'érosion éolienne notamment en zones arides et semi arides. Nous rappelons que la désertification touche  $\frac{1}{5}$  de la population mondiale avec près de 70 % des terres arides et semi arides et  $\frac{1}{4}$  de la surface du globe (Bisson et Callot, 1990 ; Tolba, 2001).



En Algérie, la superficie agricole totale (SAT) représente seulement 3% de la surface totale du pays (Fig.15). Les sols sableux y occupent une superficie de près de 60 % de la SAT (Fao, 2005).

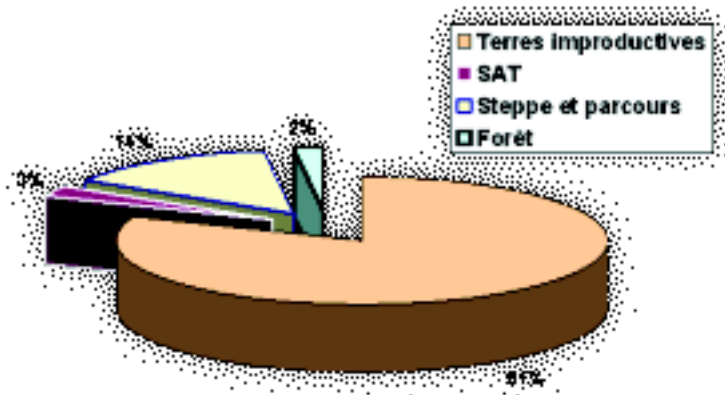


Fig. 14 - Répartition de la superficie totale de l'Algérie (Fao, 2005)

L'amélioration des sols sableux par l'ajout d'argile est une technique très ancienne. Déjà utilisé par les pharaons qui récoltaient du kaolin aux abords du Nil pour l'incorporer à leurs sols sableux, elle est rapportée par Junius Moderatus Columella 42 ans après J-C au Nord-Ouest de Rome dans son ouvrage intitulé « De re rustica » (Argod, 2001).

En Algérie du sud, cette technique est traditionnellement utilisée depuis longtemps par les agriculteurs qui utilisent l'argile d'à proximité pour améliorer le réservoir du sol et pour consolider leurs parcelles de production contre l'érosion éolienne (Rouvillois Brigol, 1973 ; Nasr, 2004).

Dans un mélange de sable et d'argile, l'une des propriétés essentielles de cette dernière est sa forte réactivité vis à vis de l'eau. Dans le mélange, le plasma argileux est assemblé avec les grains de sable dont la taille est beaucoup plus grande (10 à 1000 fois plus importante). Il s'ensuit que le mode d'assemblage des grains sableux avec le plasma argileux et les propriétés du mélange qui en découlent, dépendent en premier lieu des proportions relatives de ces deux éléments de constitution (Stengel et Gelin, 1998).

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de caractérisations des matériaux d'étude : les sables et les argiles. Nous rappelons que nous avons utilisé pour cette étude, deux échantillons de sable prélevés en bordure de mer à Mostaganem au Nord-Ouest Algérien (Fig.16) respectivement à la Salamandre et aux Sablettes et quatre échantillons de bentonite : deux provenant du gisement de Mostaganem et deux autres de celui de Maghnia situés tous les deux au Nord-Ouest Algérien.

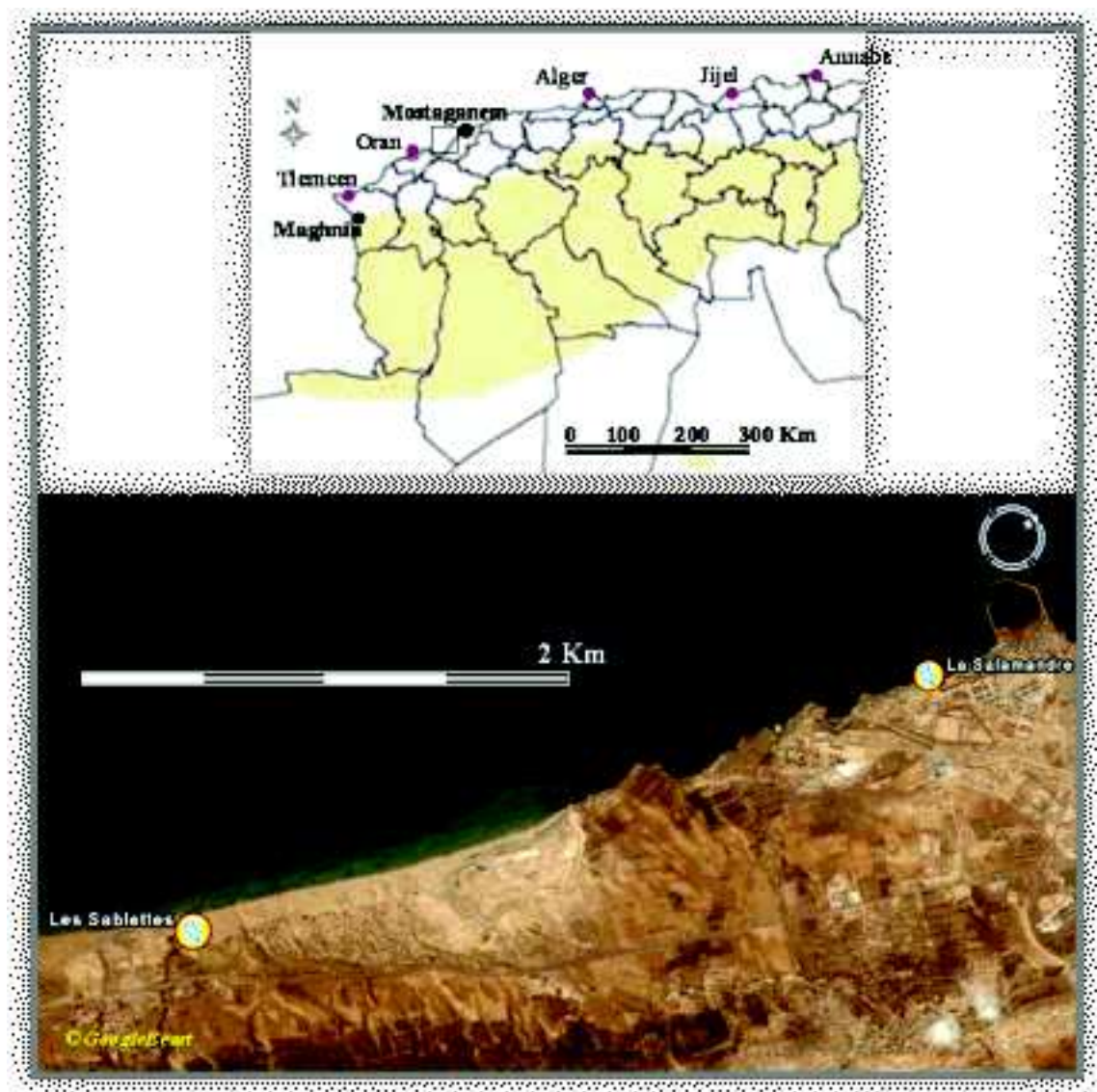


Fig. 15 - Lieux géographiques de prélèvements des échantillons de sable et d'argile

## II.1 Sables

Les deux échantillons de sables sélectionnés (les Sablettes : sable 1 et la Salamandre : sable 2) sont lavé à l'eau, puis au HCl et enfin à l'eau de javel afin d'assurer leur désinfection et donc limiter la prolifération par des micro-organismes. Les sables sont enfin rincés plusieurs fois à l'eau distillée. Les substrats obtenus sont étuvés à 105°C pendant 24 heures.

La caractérisation des sables est établie suivant les trois critères classiques (Chrétien, 1986) :

la nature et la taille modale des sables qui correspond à  $\mathcal{A}E_{70}$

la distribution de la taille des particules

la morphologie des sables

Afin d'aborder la nature et la taille modale des deux sables, nous rappelons que leur origine est littorale dunaire et qu'ils sont constitués essentiellement de quartz à plus de 99%. Leurs granulométries (Tableau 6) ont été effectuées au granulomètre laser selon la procédure définie par Dur et al. (2004). La taille du sable 1 est comprise entre 0,15 et 0,71 mm, avec un mode à 0,28 mm. Celle du sable 2 oscille entre 0,16 et 0,85, avec un mode à 0,40 mm. Ce dernier est donc relativement plus grossier que le sable 1. Nous estimons que ces deux granulométries sont globalement représentatives des matériaux provenant de dépôts éoliens du plateau de Mostaganem ( **Atroune** , 1993).

Sable 1			Sable 2		
Ø, mm	%	% <sub>cumulé</sub>	Ø, mm	%	% <sub>cumulé</sub>
0,71	25	99	0,85	24	99
0,31	25	75	0,43	25	75
0,26	25	50	0,33	25	50
0,22	24	25	0,27	24	25
0,15	1	1	0,16	1	1
$\text{Ø}_{70} = 0,28 \text{ mm}$			$\text{Ø}_{70} = 0,40 \text{ mm}$		

Tableau 6 – Résultats de la granulométrie des sables

Pour analyser les caractéristiques des deux sables il est non seulement important de se référer à la taille modale des grains, mais aussi à la distribution granulométrique qui contrôle réellement l'espace poral. A cet effet Molle (2003) montre que plus les grains sont de faible taille et de granulométrie étalée, plus la porosité du milieu est importante. L'étalement de la granulométrie d'un sable est exprimé par le coefficient d'uniformité (CU) qui équivaut au rapport de deux diamètres  $d_{60}$  et  $d_{10}$  correspondant respectivement à 60 % des particules de diamètre  $\leq d_{60}$  et 10 % des particules de diamètre  $\leq d_{10}$  :

$$CU = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

$d_{60}$  = valeur x dont 60% du matériau a un  $\text{Ø} \leq x$  mm

$d_{10}$  = valeur y dont 10% du matériau a un  $\text{Ø} \leq y$  mm

Si  $CU < 2$ , la granulométrie est uniforme et si  $CU > 2$  la granulométrie est dispersée.

A partir des mesures de granulométrie laser (Fig.17), nous avons déterminé le coefficient d'uniformité CU. Pour le sable 1, il est de 1,47 et pour le sable 2 de 1,32. Cela signifie que les deux sables ont un étalement granulométrique uniforme. Néanmoins, l'étalement relatif du sable fin est plus important que celui du sable grossier. Ce critère est très important dans l'appréhension des mélanges sables-argiles sur les plans physique et hydrique. A ce sujet, Chrétien (1986), travaillant sur la porosité de mélanges d'argile et de populations de sable de différentes granulométries et formes, conclut que les variations de la porosité ne sont dues ni à la nature de l'argile, ni au mode de préparation des échantillons, mais essentiellement aux différences d'éventail granulométrique du squelette.

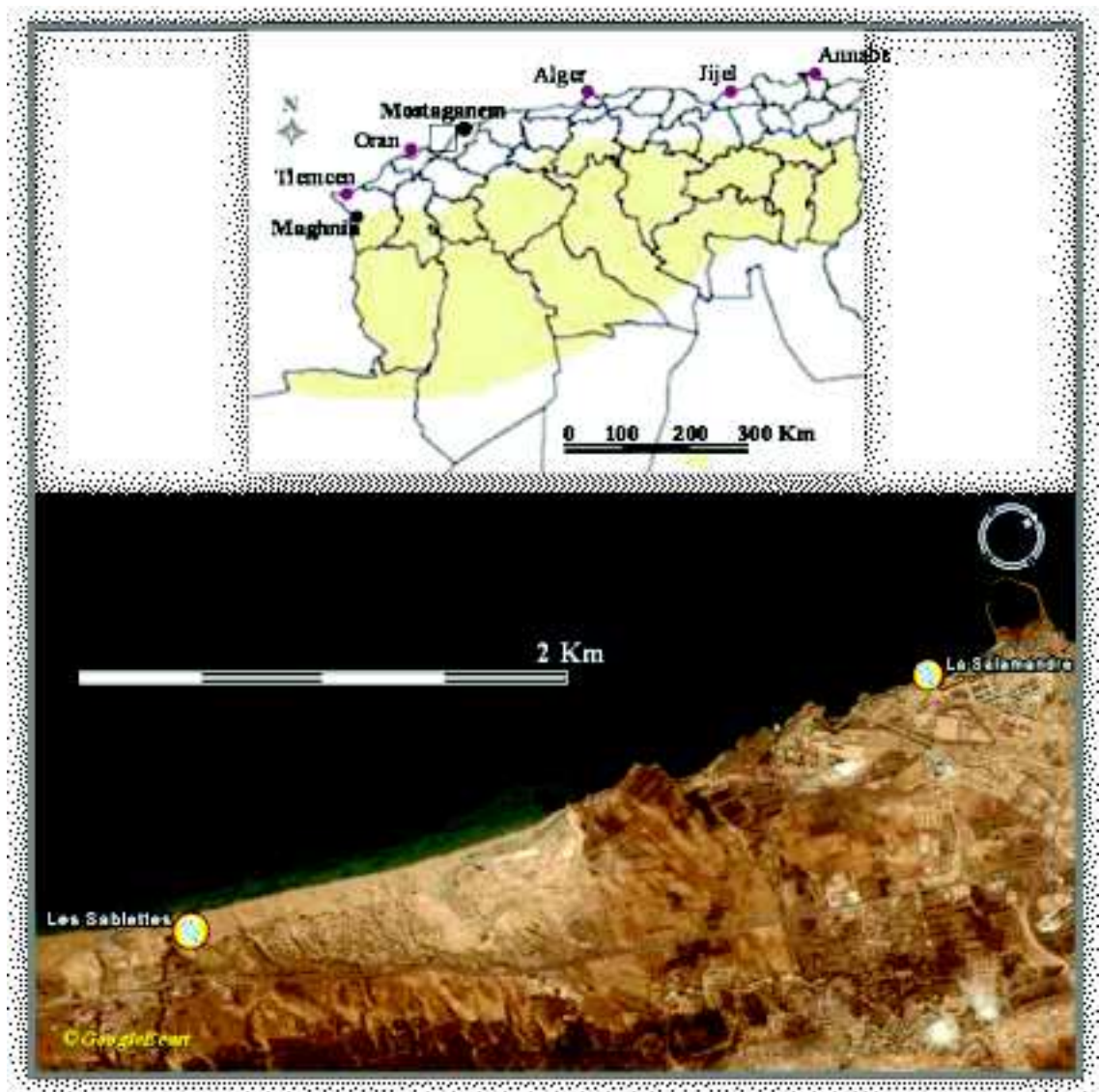


Fig. 16 – Pourcentages cumulés de la distribution du diamètre moyen des sables effectuée au granulomètre laser

Par morphologie des sables, il faut entendre quatre caractéristiques : la forme, la sphéricité, l'arrondi et l'état de surface. La forme se manifeste par trois principaux types de particules :

- compactes et équidimensionnelles
- allongées
- aplaties

A ces trois catégories de forme peuvent être ajoutés d'autres états intermédiaires aisément identifiables par un graphique triangulaire (Sneed et Folk, 1958). Cependant, nous allons faire appel à deux techniques plus intéressantes pour l'analyse morphologique de nos deux sables :

- la *morphoscopie* qui consiste en l'observation ponctuelle des particules sableuses au microscope ou la loupe binoculaire munie d'un appareil photo numérique. Ceci permet d'obtenir des données qualitatives de forme, d'aspect et d'état de surface en vue d'en déduire les actions spécifiques des agents d'érosion.

la *morphométrie* dont le but est de compléter la morphoscopie par des mesures pouvant quantifier un paramètre par un chiffre. A cet effet, plusieurs études étaient consacrées à deux concepts largement utilisés de nos jours et connus sous l'appellation d'indices de sphéricité et d'arrondi (Cailleux et Tricart, 1963 ; Le Ribault, 1980).

L'indice de sphéricité ( $I_s$ ) représente le degré de rapprochement du grain de sable d'une forme sphérique et que Wadell[1] a défini comme suit (Cailleux et Tricart, 1963) :

$$I_s = \sqrt[3]{\frac{V_p}{V_{cs}}} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} V_p = \text{volume de la particule sableuse} \\ V_{cs} = \text{volume de la plus petite sphère circonscrite} \end{array}$$

L'indice d'arrondi ( $I_a$ ) est exprimé par le rapport :

$$I_a = \frac{\text{moyenne des rayons de courbure des convexités du grain de sable}}{\text{rayon du plus grand cercle inscrit dans le grain}}$$

Krumbein et Sloss, ont mis une méthode très simple pour la détermination expérimentale des indices  $I_s$  et  $I_a$  (Brewer, 1964 et Vatan, 1967). Il suffit pour cela, de comparer les grains de sables étudiés à une charte graduée, qui se compose de dessins de grains présentant les indices de sphéricité et d'arrondi comme le montre la figure 18.

A l'aide de cette charte visuelle d'usage commode, il nous a été possible de caractériser de façon précise les deux sables étudiés en effectuant des comptages statistiques de formes de 100 grains de chacun des sables.

Sur le plan morphoscopique, la littérature nous rapporte qu'il existe 3 types fondamentaux de quartz connus (Cailleux et Tricart, 1963) :

*les émoussés luisants* : qui se caractérisent par un contour général à angles émoussés à arrondis et une surface brillante. Ce sont des grains usés dans l'eau, à la suite d'un long frottement avec roulement.

*les ronds mats* : reconnaissables par leur contour général émoussé, plus rond en moyenne que dans le cas précédent et une surface entièrement dépolie. Ils résultent d'une longue usure par chocs dans l'air sous l'effet du vent.

*les non usés* : contours anguleux et faces des cassures lisses ou ternes.

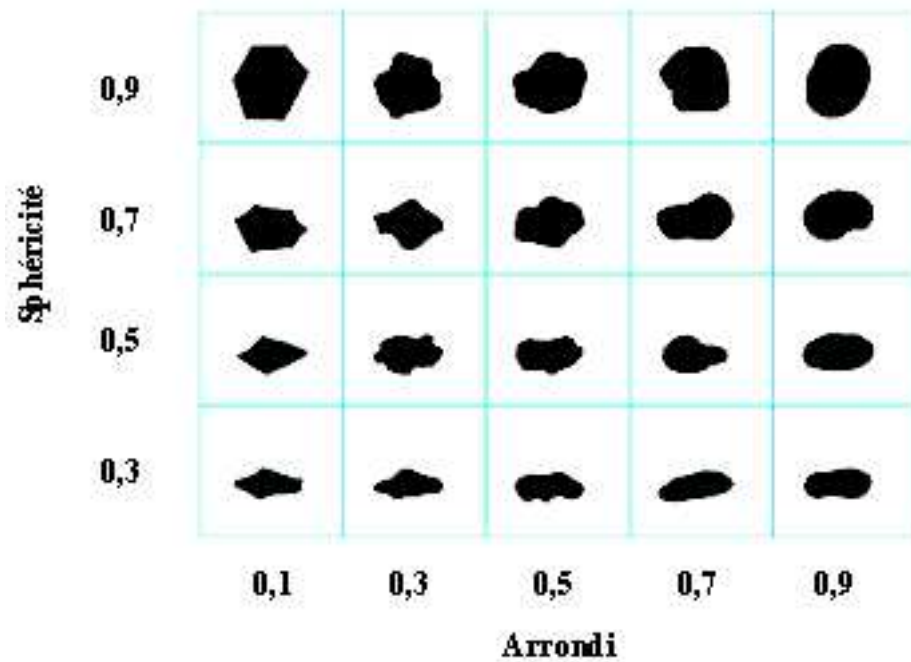


Fig. 17 - Charte visuelle d'estimation d'arrondité et sphéricité des sables (Chrétien, 1971)

Les observations (Photo 1), montrent, de prime abord, que les deux populations de sable sont de types ronds mats. Les indices de sphéricité et d'arrondi sont susceptibles de caractériser davantage nos deux échantillons.

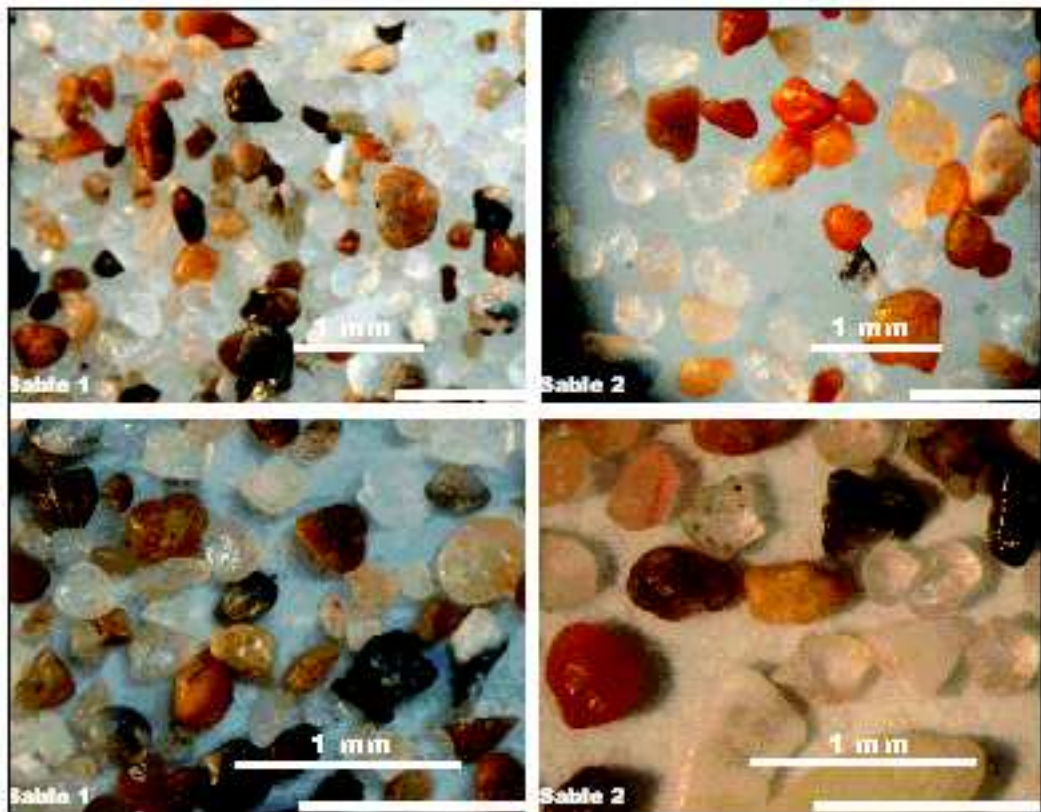


Photo 1 - Formes et dimensions des deux sables

En effet, nous remarquons (Fig.19), que l'indice de sphéricité enregistre des valeurs supérieures à 50 % à 0,7 pour les deux sables, ce qui signifie que la forme évolue bien vers une tendance ronde qui est relativement plus connotée pour le second sable par rapport au premier. En outre, l'indice d'arrondi enregistre, également pour les deux populations de sable, des valeurs en pourcentage cumulé inférieures à 20 % à 0,3 et supérieures à 60 % à 0,7. Ce qui montre bien, que les grains sont de forme générale arrondie pour les deux sables avec une légère résonance du second, le plus grossier.

En résumé, les observations morphoscopiques et morphométriques, confirment l'origine éolienne des deux sables étudiés étant connu dans la littérature que ce type de matériau évolue en forme arrondie due essentiellement à une longue usure des grains sous l'effet de chocs violents (Cailleux et Tricart, 1963).

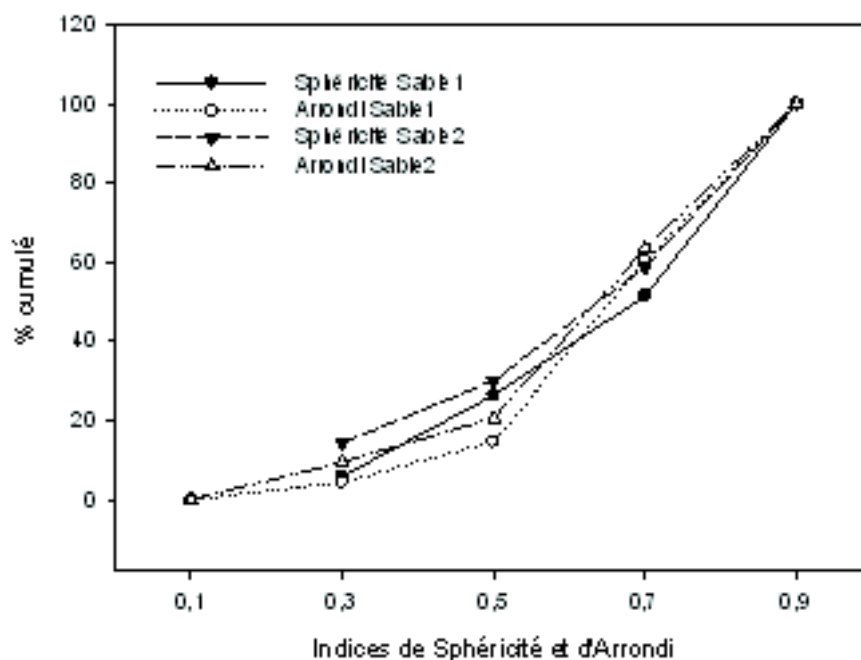


Fig. 18 - Indices de sphéricité et d'arrondi en pourcentage cumulé des deux sables

## II.2 Argiles

### II.2.1 Présentation des gisements

#### II.2.1.1 Gisement de Mostaganem

Le gisement de bentonite de Mostaganem est situé à 37 Km au Nord-Est du chef lieu de la Wilaya dans une localité appelée Mzila. Outre la dénomination "bentonite de Mostaganem", il existe celle de "bentonite de Mzila" relative à la localisation du gisement. La région de Mzila appartient au bassin sédimentaire du Chélif. Elle est constituée de formations d'âge miocène à quaternaire et est composée de couches d'épaisseurs variant de 0,5 à 9 m intercalées

dans le miocène supérieur. On y retrouve des grès à la partie inférieure et des marnes (à 500 m) et des argiles gypseuses à la partie supérieure. Dans la région du gisement, des niveaux de grès à biotite sont très fréquents entre et dans les couches d'argile bentonitique. Les phénocristaux de biotite et de feldspath sont faiblement altérés voir même intacts. Certaines études attribuent la genèse de cette bentonite aux laves, pyroclastes et cendres de nature rhyolitique qui a marqué le Tortonien terminal et le Messinien inférieur dans la région (Bensallah et al., 1987).

Le nombre de couches bentonitiques incluses dans le calcul de la réserve du gisement potentiellement utilisable industriellement est de 14. A cause de l'hétérogénéité des couches, chacune est subdivisée en parcelles. L'exploitation de ce minerai est assurée depuis 50 ans par une entreprise nommée Bental implantée au port de Mostaganem. En surface du gisement, les couches sont échantillonnées par prélèvement de carottes selon un maillage carré de 10 m de côté. Les couches de bentonites suivent les flancs d'une structure synclinale dont l'axe plonge vers l'Ouest à un angle moyen d'environ 25°.

Etant donné que le produit est destiné essentiellement à l'industrie pétrochimique, son classement est effectué selon les critères du secteur en deux grands groupes selon qu'il soit sodique ou calcique :

*la bentonite calcique* a un indice de gonflement faible non favorable à une utilisation comme additif refroidissant et lubrifiant des boues de forages. En revanche, elle présente une capacité d'absorption d'eau élevée qui lui permet de valoriser la production de terres décolorantes.

*la bentonite sodique* est gonflante. Son indice de gonflement étant proportionnel à sa teneur en sodium, elle convient parfaitement pour les boues de forage.

D'après Bental (2002), la bentonite de Mzila est plus sodique que celle du Roussel de Maghnia. Elle enregistre une teneur en Na<sub>2</sub>O supérieur à 2% (proche de celle du Wyoming), ce qui lui confère un indice de gonflement compris entre 16 et 20 favorable à la production de bentonite de forage.

L'autre utilisation industrielle de la bentonite de Mostaganem concerne les moules de fonderie qui requièrent une argile de résistance à la compression supérieure à 570 g.cm<sup>-2</sup>, à l'état humide et supérieure à 3400 g.cm<sup>-2</sup>, à l'état sec. De plus, la résistance au cisaillement doit être supérieure à 165 et 510 g.cm<sup>-2</sup>, respectivement aux états humide et sec. La bentonite est également utilisée pour l'enrobage de produits tels que les engrais chimiques. Dans ce cas, la seule spécification recommandée concerne son humidité qui ne doit pas dépasser 18% (Bental, 2002). Le tableau suivant donne les parts de production de la bentonite de Mostaganem pour chaque utilisation :

Tableau 7 – Production de la bentonite de Mostaganem en fonction de son utilisation (Bental, 2002)

Utilisation de la bentonite	Production, tonnes.an <sup>-1</sup>	Pourcentage
Forage	12 000	70,59
Fonderie	2 000	11,76
Charge (enrobage)	3 000	17,65
Total	17 000	100,00

### II.2.1.2 Gisement de Maghnia



Le gisement de bentonite est situé à 15 km au Nord-Est de la ville de Maghnia. La bentonite de Maghnia est un exemple typique de l'action hydrothermale sur le matériel volcanique (Sadran et al., 1955). En effet, le Nord-Ouest Maghrébin a connu dans son histoire géologique des événements volcaniques qui s'échelonnent du Précambrien au Quaternaire ancien. Les plus importants sont ceux du Miocène supérieur. Plusieurs pointements volcaniques affleurent dans le paysage, ils sont altérés en partie en montmorillonite, qui transforme la roche volcanique d'origine obsidienne ou parfois rhyolitique. La transformation peut atteindre soit certains bancs concentriques à la structure du culot volcanique, soit certains autres plutôt diagonaux, soit enfin le cœur même du culot. Les brèches volcaniques latérales sont également transformées en ciment, éléments bréchiques et en pierre à savon. Les formations sédimentaires des environs du culot contiennent des couches de montmorillonite et des niveaux de graviers rhyolitiques. Ces faits montrent que l'altération hydrothermale s'est faite par manifestation volcanique qui a transformé les laves, le long des fissures par lesquelles les fumerolles s'échappaient. Les parties transformées ont été remaniées dans le bassin en fines particules qui se sont déposées. Les roches rhyolitiques au contraire ont donné des niveaux graveleux. Autochtones ou allochtones, la bentonite de Maghnia est le produit d'évolution de verres volcaniques sous l'influence des venues hydrothermales profondes (Millot, 1964).

La réserve exploitable du gisement est estimée à 1 100 000 tonnes (Bental, 2002). L'exploitation du gisement est assurée par une entreprise pourvue d'une usine de traitement située en zone urbaine dans la ville de Maghnia. Les deux principales formes de bentonite produites sont : la bentonite de forage et celle de décoloration des huiles (Tableau 8) :

Tableau 8 – Production de la bentonite de Maghnia en fonction de l'utilisation (Bental, 2002)

Utilisation de la bentonite	Production, tonnes.an <sup>-1</sup>	Pourcentage
Forage	7 000	63,64
Terre décolorante	4 000	36,36
Total	11 000	100,00

## II.2.2 Caractérisation des argiles

### II.2.2.1 Préparation des échantillons et extraction

L'une des opérations les plus importantes pour la préparation de l'argile en vue de son étude est la séparation de sa fraction < 2 µm du reste de l'échantillon. Pour cela nous avons adopté les méthodes d'analyses utilisées aux laboratoires de l'Unité PESSAC : Physico-Chimie et Ecotoxicologie des Sols d'Agrosystèmes Contaminés (ex Science du Sol) de l'INRA de Versailles mises en œuvre par Robert et Tessier (1974). Pour les deux bentonites le protocole d'extraction a comporté les opérations suivantes :

Agitation mécanique à la roue vélo en présence de billes en verre, ensuite décantation pendant 48 h, pour voir la tendance de décantation.

Saturation à NaCl 1M (58,44 g de NaCl dissout dans un litre d'eau distillée)

Lavage plusieurs fois à l'eau distillée

Extraction de la fraction inférieure à 2 µm au bout de 3 minutes de centrifugation à 800 trs.mn<sup>-1</sup> conformément à la loi de Stokes ensuite siphonage à une hauteur de 9 cm.

En plus de la séparation, il est important de compléter l'étude de caractérisation de l'argile par d'autres analyses. Pour cela nous avons effectué une analyse par diffraction aux rayons X pour l'identification des minéraux cristallisés, une analyse chimique pour identifier les espèces chimiques et leurs teneurs dans le matériau et une analyse thermique en vue de compléter et confirmer les analyses précédentes.

La diffraction aux rayons X, est effectuée sur l'échantillon brut et sa fraction inférieure à 2  $\mu\text{m}$ . Le matériau est alors identifié par trois types de diagrammes :

Diagramme normal, l'échantillon est séché à l'air libre.

Diagramme éthylène glycol, l'échantillon est en contact d'une vapeur d'éthylène glycol à température ambiante pendant une nuit.

Diagramme de chauffage, l'échantillon est chauffé à une température de 200°C pendant une nuit ensuite passé sous vide.

L'analyse chimique a pour objectif de déterminer la composition chimique des échantillons bruts et de leurs fractions fines (< 2  $\mu\text{m}$ ) et de construire la formule structurale qui permet de mieux préciser la répartition des charges de surface des minéraux. Par la suite, la microscopie électronique par transmission (MET), permettra d'identifier individuellement les particules argileuses et leur composition en différents minéraux accessoires, et donc de mieux aborder la question de la variabilité de la composition chimique.

L'analyse thermique consiste à de porter l'échantillon à un chauffage progressif jusqu'à 1000°C et de quantifier en conséquence sa perte en poids. Elle permet en connaissant les différentes pertes de poids de connaître les types d'eau et par delà de contribuer à préciser les proportions des différents minéraux. Le tableau 9 indique les constituants relatifs aux différentes franges thermiques de l'échantillon (Robert, 1977). Dans ce cas, la vitesse de chauffage est suffisamment lente (2° C par minute), pour permettre une identification aisée des divers phénomènes qui s'y manifestent telle que la déshydratation, ou la décarbonatation (Caillère et *al.*, 1982)

Tableau 9 – Intervalles de températures caractéristiques des constituants des sols (Robert, 1977)

Température, °C	Constituant
0 – 150	Eau liée aux cations
150 – 400	Hydroxydes (OH)
400 – 800	Silicates (OH)
800 – 1000	Carbonates (CO <sub>2</sub> )

### II.2.2.2 Essai de modélisation des diagrammes aux rayons X et analyse thermique différentielle (ATD)

L'identification de la nature d'une argile se fait en fonction de sa réponse aux tests de comportements selon le schéma de l'organigramme de la figure 20. Sur cette base, nous allons présenter les résultats de l'analyse de diffraction aux rayons X pour la bentonite de Mostaganem et ensuite pour celle de Maghnia.

#### II.2.2.2.1 Bentonite de Mostaganem

Cette argile a déjà été étudiée par Halilat (1998), nous effectuerons l'analyse aux rayons X seulement pour deux échantillons provenant des couches n° 11 et 14 du gisement. En revanche, nous les analyserons plus en détail sur les plans physique et chimique pour les besoins d'une comparaison fiable entre les différents échantillons en fonction des conditions des prélèvements pour Halilat et nous même.

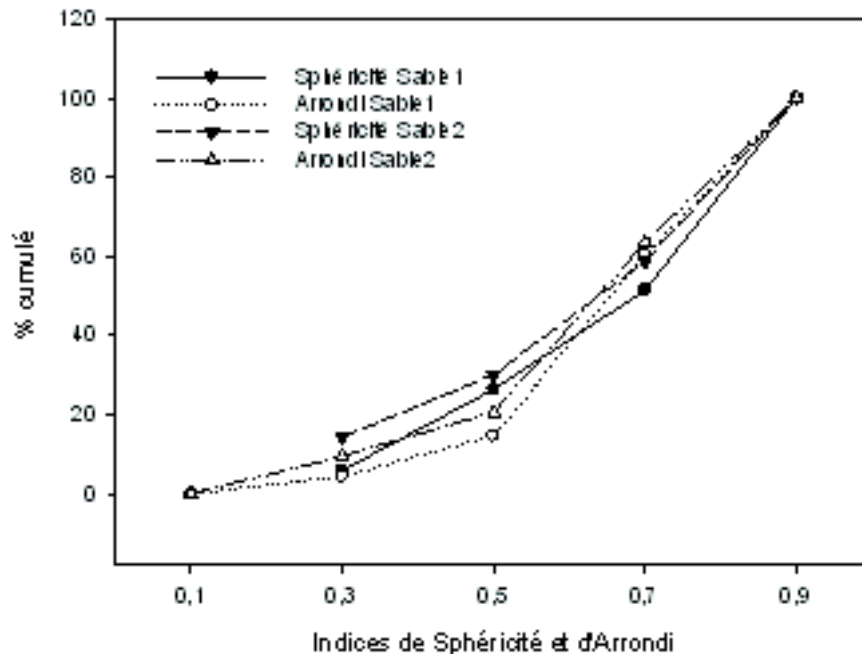


Fig. 19 – Tests de comportements des argiles en vue de leur identification

Echantillon C<sub>11</sub> (couche n° 11)

Les diagrammes des rayons X (Fig.21) effectués sur la fraction < 2 µm, montrent un pic à 15,27 Å et un autre à 17,12 Å après traitement à l'éthylène glycol. Ce comportement est typique aux smectites.

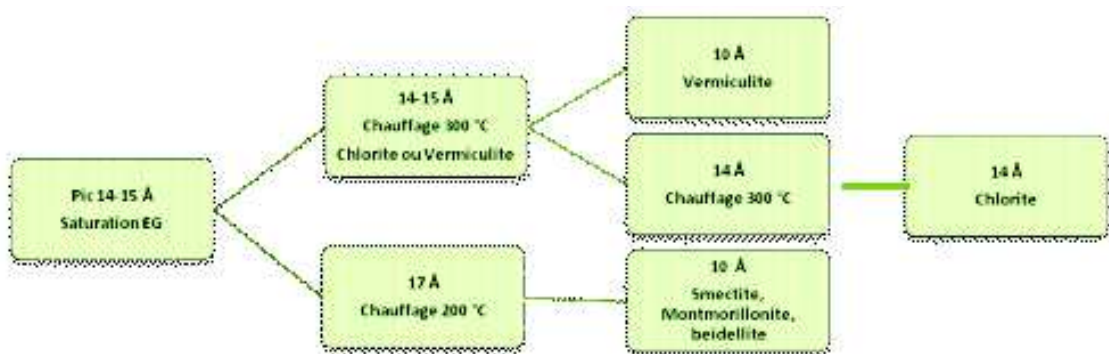


Fig. 20– Diagramme aux rayons X de la fraction < 2 µm d'un échantillon de la couche N° 11 du gisement à bentonite de Mostaganem

En outre, le chauffage à 200°C indique une fermeture à 9,68 Å. Par ailleurs, un diagramme similaire mais réalisé sur un échantillon brut (Fig.22), montre que ce matériau présente beaucoup de mica (phlogopite).

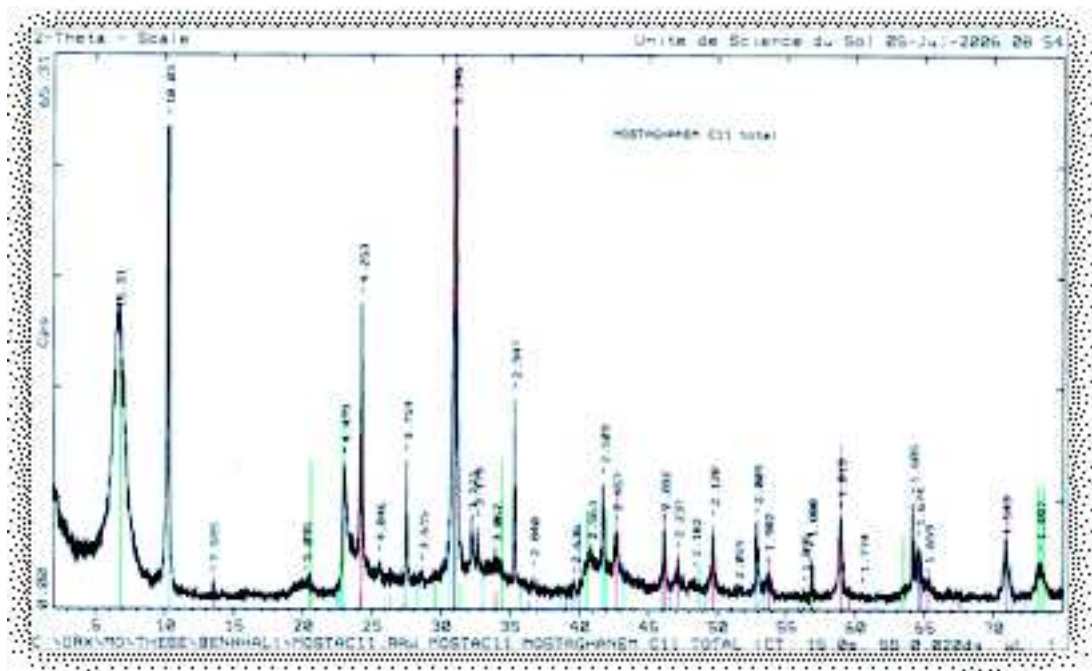


Fig. 21– Diagramme aux rayons X d'un échantillon brut de la couche N° 11 du gisement de Mostaganem

Echantillon C<sub>14</sub> (couche n° 14)

Afin de vérifier l'hétérogénéité du matériau bentonitique nous avons caractérisé un échantillon du même gisement mais appartenant à une autre couche. Le diagramme séché à l'air (Fig.23) indique la présence de smectite avec plage micacée et quelques traces de calcite et d'albite.

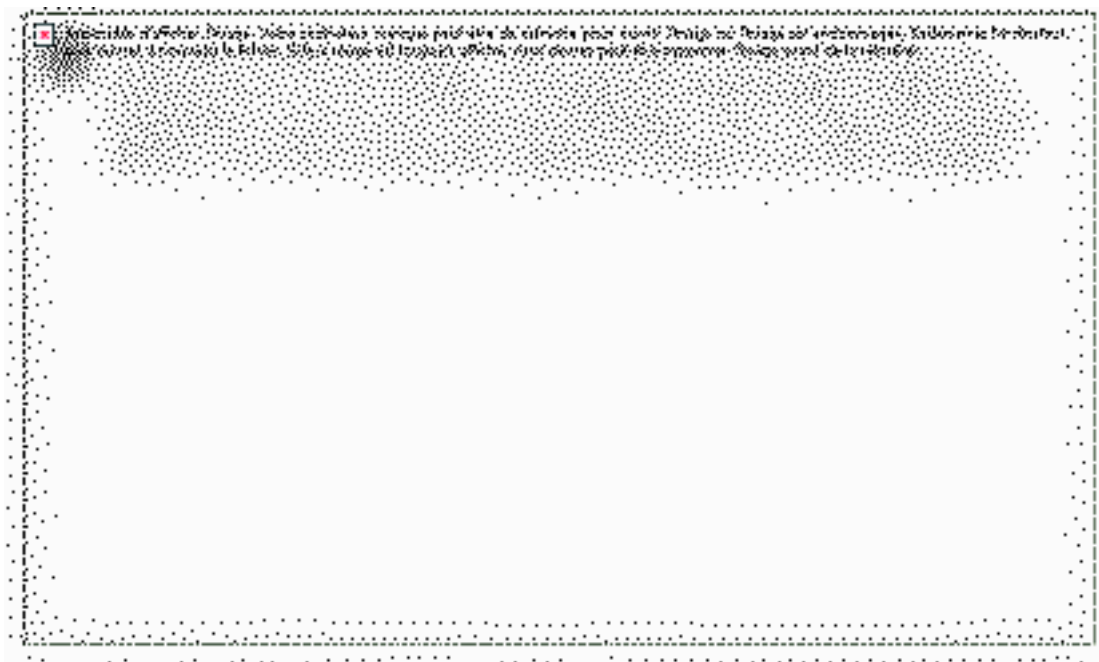


Fig. 22- Diagramme normal d'un échantillon brut (couche 14) du gisement de Mostaganem

Ces données confirment que le gisement de Mostaganem est composé de smectites avec des impuretés. Il est probable que ces impuretés ne modifient pas de façon importante les propriétés de la bentonite, du fait qu'elles sont peu réactives et en faible quantité.

### II.2.2.2 Bentonite de Maghnia

Contrairement au cas de Mostaganem, nous allons analyser avec plus de détail les échantillons de l'argile de Maghnia. En premier lieu, c'est la bentonite que nous avons utilisée dans nos expérimentations, particulièrement l'échantillon 1, et en second lieu, elle n'a pas été étudiée jusqu'à présent dans des conditions de contraintes abiotiques de salinité et de sodicité.

#### a. Echantillon 1

Pour cet échantillon, nous commençons par les diagrammes de rayons X (Fig.24). La distance interfoliaire de la fraction < 2  $\mu\text{m}$  de cet échantillon, dans le test normal, est

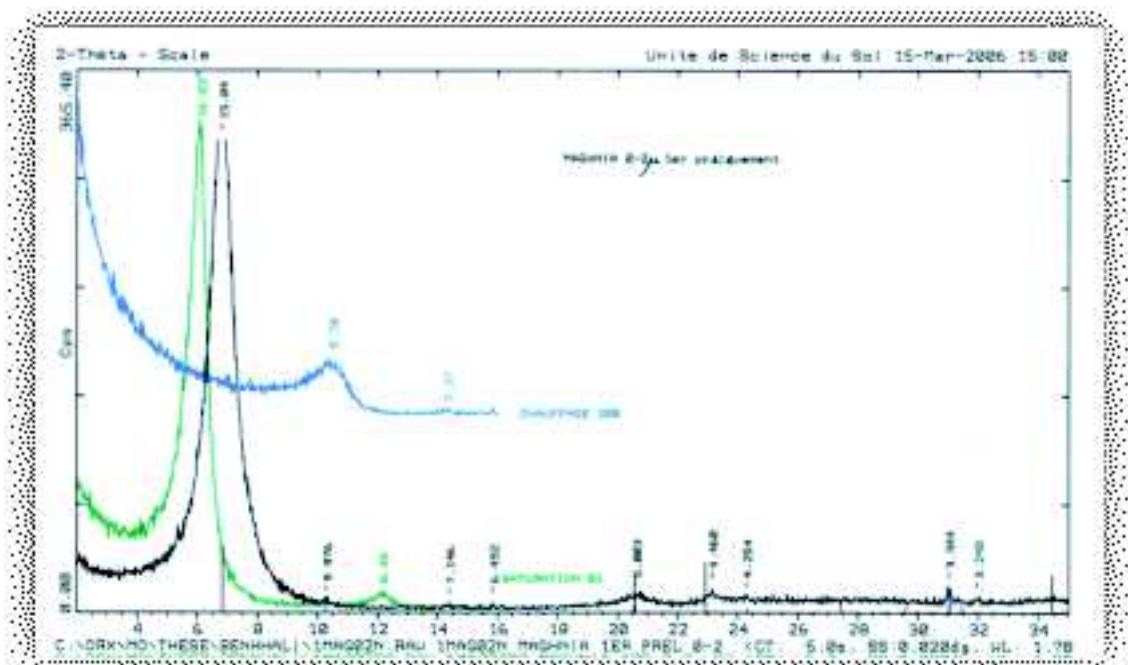


Fig. 23– Diagramme aux rayons X de la fraction inférieure à 2  $\mu\text{m}$  d'un échantillon de la bentonite de Maghnia

de 15,0 Å. Dans le cas de l'éthylène glycol, cette distance passe à 16,8 Å. La courbe de chauffage à 200 °C présente un pic à 9,8 Å. Ces résultats montrent donc que l'échantillon 1 de bentonite de Maghnia est une smectite.

De plus, le diagramme normal, indique une faible présence de Na du fait de la symétrie de cette courbe et de l'absence de pic à 12 Å. Ceci peut être confirmé plus loin par les résultats chimiques de l'échantillon. Ceci signifie dire que c'est un ion bivalent qui doit être en proportion majoritaire, soit le calcium ou le magnésium. Nous avons également effectué un diagramme de diffraction des rayons X pour les fractions respectivement brute et supérieure à 50  $\mu\text{m}$  (Figs. 25 et 26).

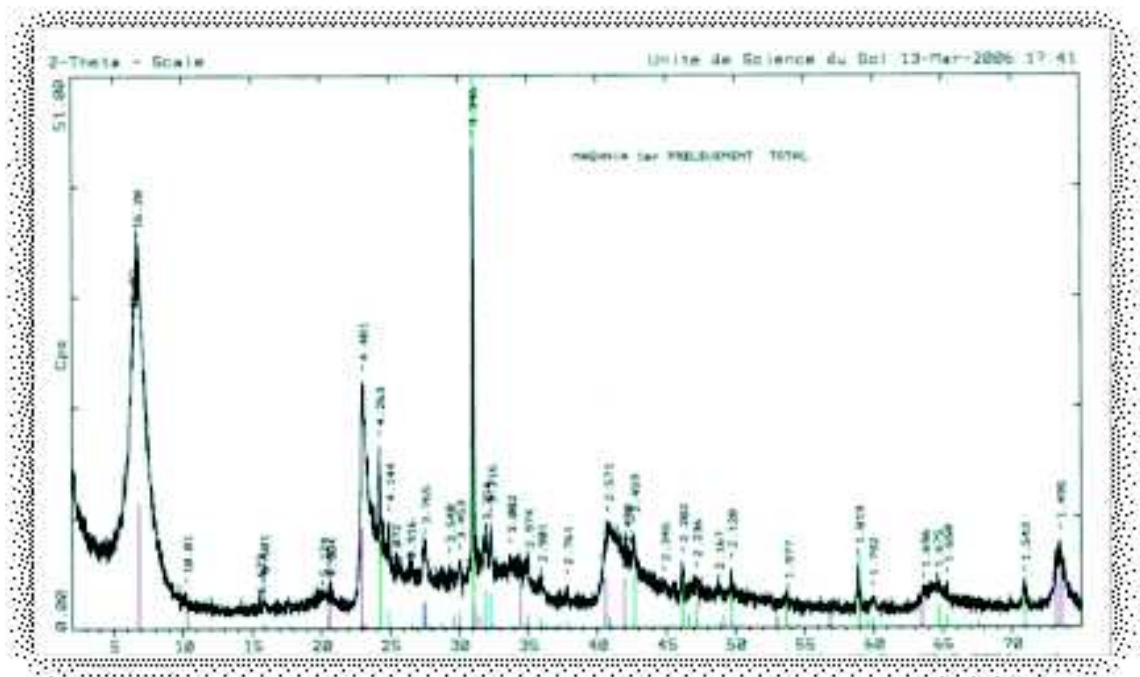


Fig. 24 – Diagramme normal aux rayons X d'une fraction brute de l'échantillon 1 de bentonite de Magnhia

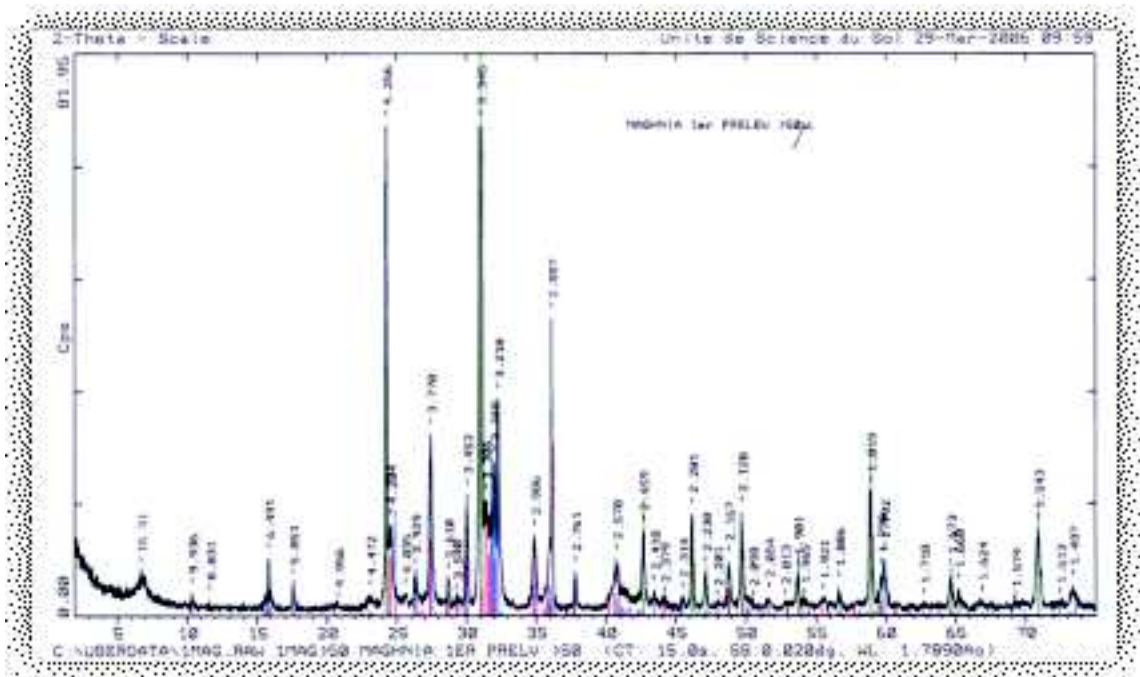


Fig. 25 – Diagramme normal (séché à l'air) de diffraction aux rayons X pour la fraction > 50 µm de l'échantillon 1 de bentonite de Magnhia

Dans ce cas de figure, nous percevons que l'argile brute contient encore de la smectite. Elle contient cependant beaucoup d'impuretés, un peu d'illite, du quartz et du feldspath essentiellement potassique. Nous remarquons également des agrégats d'argile qui ne sont pas encore dispersés (Fig. 26) sur le diagramme orienté de la fraction supérieure à 50 µm.

La courbe d'analyse thermique (Fig.27), montre que le diagramme de l'ATD se compose de trois phases délimitées par des points d'inflexion subhorizontaux lisibles en bas de la figure. La signification de ces trois phases est résumée dans le tableau 10, qui montre que la fraction < 2 µm de cette argile perd 16 % de son poids de la température ambiante à 294 °C.

Tableau 10 – Perte en poids de l'échantillon 1 brut de bentonite en fonction de la température

Température °C	0 - 294	294 - 540	540 - 812	> 812
Perte de poids %	16,1	1,5	2,7	< 1
Signification	Départ de l'eau liée aux cations	Présence faible d'hydroxydes et de matière organique	Faible présence de groupements OH des silicates	Faible présence de CaCO <sub>3</sub>

Les pertes de poids enregistrées pour la seconde et la troisième phase respectivement de 1,5 et 2,7 %, révèlent une faible présence d'hydroxydes, de matière organique, de groupements OH des silicates et peut être de carbonate de calcium.

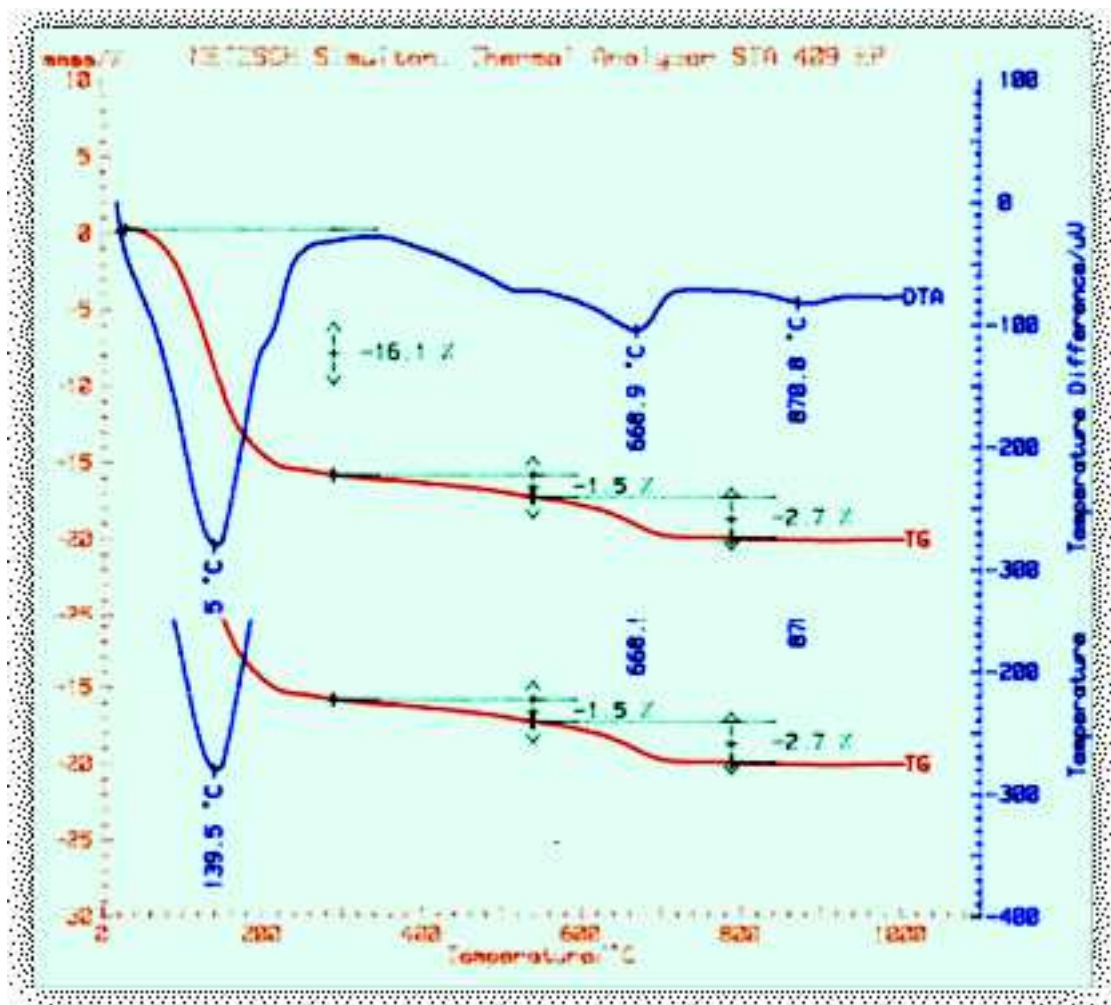


Fig. 26– Diagramme de l'analyse thermique différentielle (ATD) de la fraction < 2 µm de l'échantillon 1 de la bentonite de Maghnia

Ces données indiquent que la bentonite brute comprend une forte proportion de smectite. En effet, pour une smectite pure développant une surface spécifique d'environ

$750 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ , la perte d'eau à  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  est d'environ 23%. Nous en concluons que cette argile contient près de 66% de smectite. Ce chiffre est confirmé par la perte de l'eau engendrée par les OH (2,7%) alors que pour une smectite pure elle serait de l'ordre de 3,5%.

Le besoin de plus d'informations sur les distances interfoliaires de la fraction  $< 2 \mu\text{m}$  de l'échantillon, nous amène à étudier plus en détail la position et l'intensité des pics, notamment afin d'identifier les mélanges de phases. A cet effet nous avons adopté une méthode de décomposition des spectres en utilisant le modèle mathématique Decompr (Lanson et Besson, 1992 ; Righi et Elsass, 1996). La décomposition était réalisée sous un potentiel hydrique de  $-100 \text{ MPa}$  (Fig. 28).

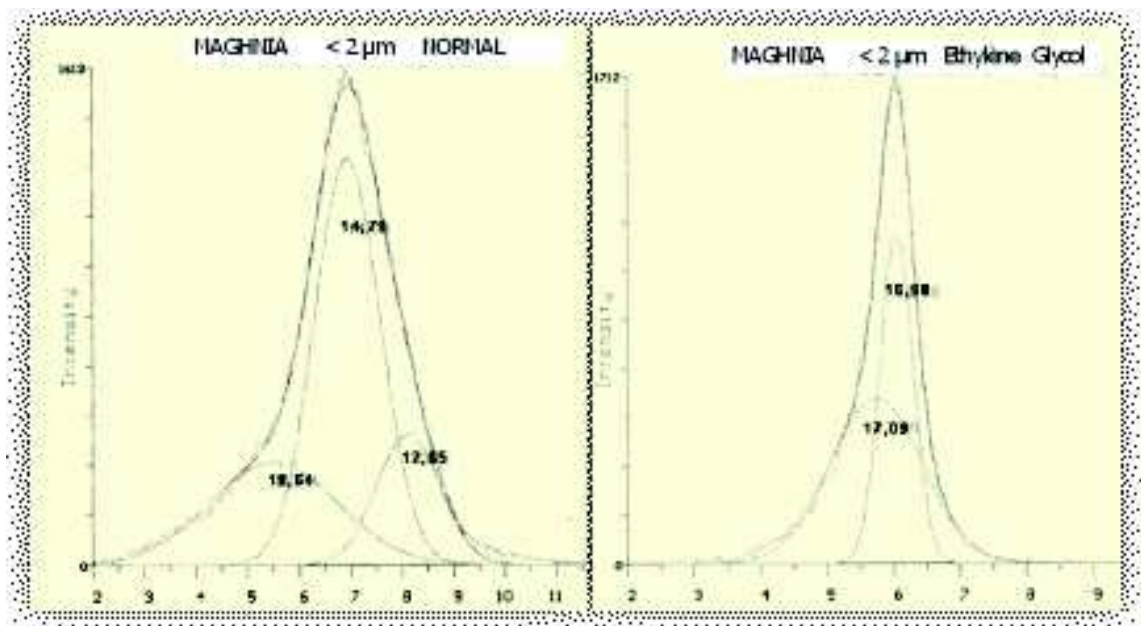


Fig. 27 – Distribution des probabilités de décomposition du pic principal d'après le programme Decompr de la fraction  $< 2 \mu\text{m}$  Ca.

Sachant que la distance d'un feuillet anhydre de smectite est de  $10 \text{ \AA}$  et qu'une couche d'eau correspond à une épaisseur de  $3 \text{ \AA}$ , il s'ensuit qu'une, deux ou trois couches d'eau correspondraient respectivement à des pics de  $12,6$ ,  $15,6$  et  $18,6 \text{ \AA}$ . Les deux graphes de la figure 28, démontrent la présence de trois pics respectifs de  $12,65$ ,  $14,79$  et  $18,64 \text{ \AA}$ . Ceci révèle une certaine hétérogénéité du matériau qui est certainement liée à la présence de feuillets de charges différentes. Les espaces interfoliaires les plus étroits ( $12,6 \text{ \AA}$ ) correspondent à des feuillets pour lesquels l'échange Na-Ca n'a pas été complet. A  $15,6 \text{ \AA}$  on a la distance caractéristique des smectites Ca. A  $18,6 \text{ \AA}$  on a des feuillets de basse charge décrits par exemple par Tessier (1984). Néanmoins, nous obtenons seulement deux pics dans le cas du traitement à l'éthylène glycol situés respectivement à  $16,98$  et  $17,09 \text{ \AA}$ , ce qui dénote que l'insertion du glycol s'est opérée en couches très homogènes liée à la réorganisation de l'espace interfeuillelet par cette molécule organique. D'une certaine façon l'éthylène glycol est moins discriminant que l'eau.

## Echantillon 2

Pour l'échantillon 2, nous faisons les mêmes constatations que pour le premier, sauf pour les cas de saturation à l'eau et à l'éthylène glycol, où une légère asymétrie indique la présomption de sodium en quantité plus importante que précédemment (Fig. 29). Ceci



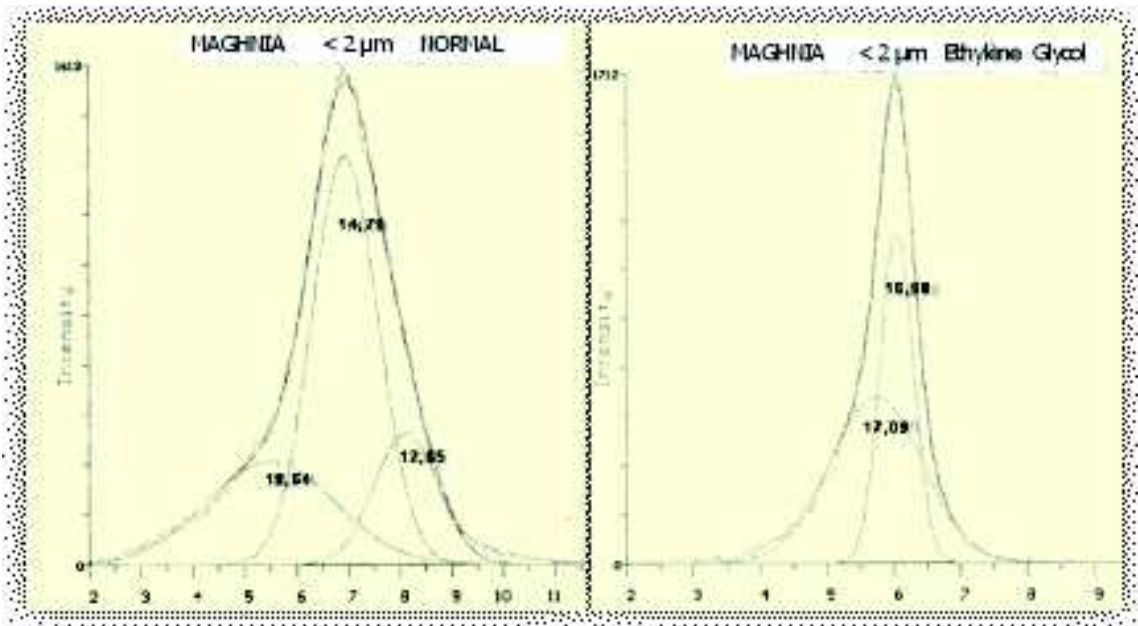


Fig. 28 – Diagramme aux rayons X de la fraction < 2 µm de l'échantillon 2 de la bentonite de Maghnia

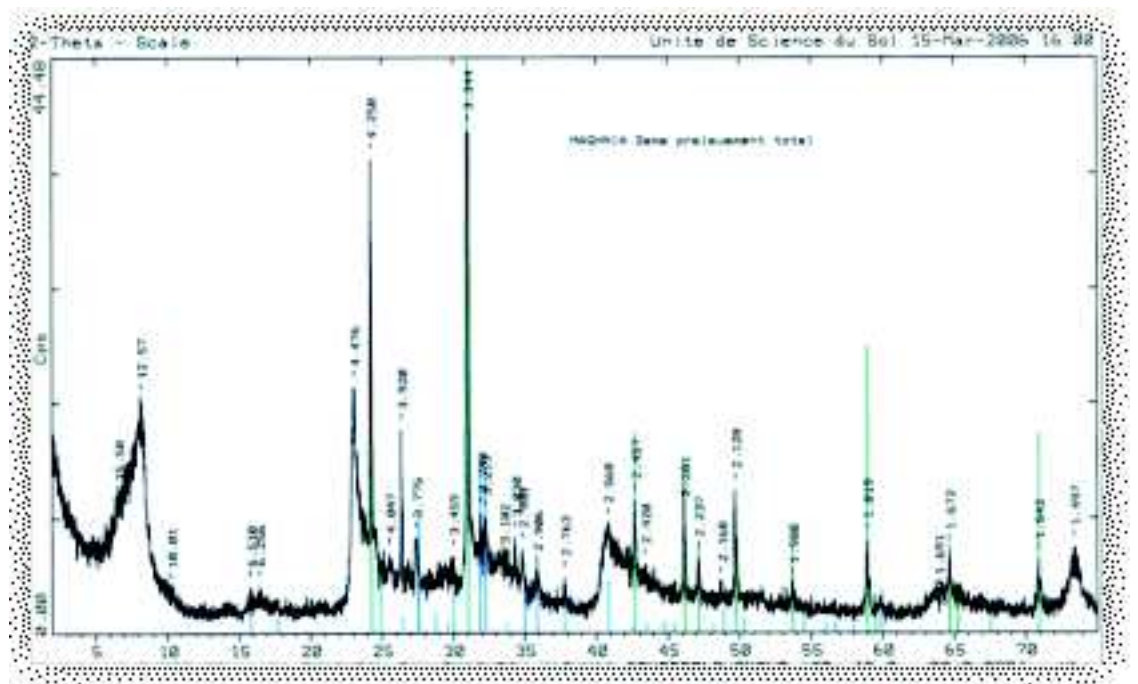


Fig. 29 – Diagramme normal de l'échantillon 2 brut de la bentonite de Maghnia

peut être également confronté aux résultats chimiques qui montrent que la teneur en Na échangeable est plus élevée confirmant ainsi la diffraction des rayons X.

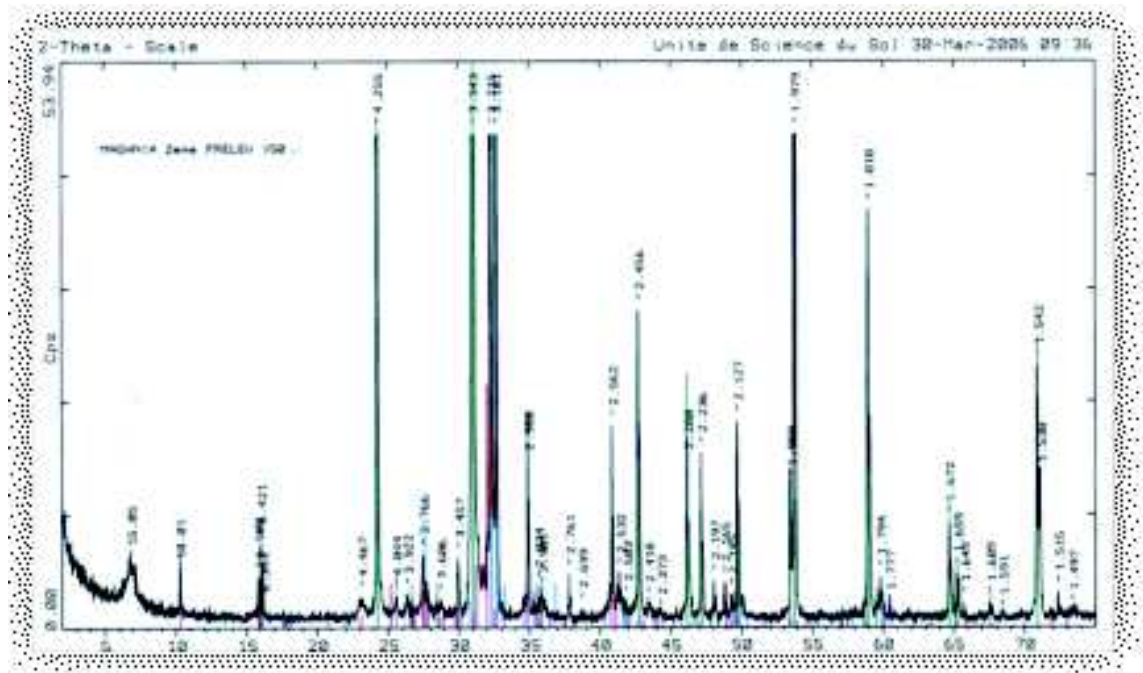


Fig. 30 – Diagramme normal aux rayons X d'un échantillon > 50  $\mu\text{m}$  du gisement à bentonite de Maghnia

En résumé, nous confirmons la nature smectique de la bentonite de Mostaganem étudiée par Halilat (1998), néanmoins nous constatons que des différences relatives se manifestent entre les échantillons 11 et 14 liées au fait que leurs prélèvements ont été effectués dans deux endroits différents du gisement de Mzila. La même remarque est valable pour les deux échantillons de la bentonite de Maghnia. Nous pensons qu'il est prématuré de dresser une comparaison exhaustive entre les différents échantillons des deux bentonites, étant donné qu'il reste encore les paramètres physiques et chimiques à intégrer. Néanmoins, nous devons relever ici que la caractérisation d'une argile de gisement est subordonnée à la qualité de son échantillonnage. Ce facteur est important particulièrement quand il s'agit de l'appliquer dans le calcul des doses à appliquer afin d'améliorer les propriétés des sols sableux.

### II.2.2.3 Données minéralogiques

Pour une caractérisation minéralogique des différents échantillons de bentonite, nous avons considéré l'argile à l'état brut et sa fraction < 2  $\mu\text{m}$ . La formule structurale permet d'identifier plus précisément les charges structurales moyennes de la bentonite. Nous présentons les résultats respectivement pour la fraction brute et celle < 2  $\mu\text{m}$  pour les deux bentonites étudiées.

#### II.2.2.3.1 Echantillons à l'état brut

##### a. Bentonite de Mostaganem

Les résultats granulométriques, organiques et chimiques des deux échantillons 11 et 14 de l'argile de Mostaganem sont présentés dans le tableau 11 :

Paramètres	Unité	Echantillon 11	Echantillon 14
<b>Données granulométriques</b>			
Argile ( $\leq 2 \mu\text{m}$ )	g.kg <sup>-1</sup>	412	504
Limons fins (2 – 20 $\mu\text{m}$ )		267	251
Limons grossiers (20 – 50 $\mu\text{m}$ )		108	48
Sables fins (50 – 200 $\mu\text{m}$ )		132	77
Sables grossiers (200 – 2000 $\mu\text{m}$ )		81	120
Humidité		50	78
<b>Données organiques</b>			
Carbone organique	g.kg <sup>-1</sup>	1,09	1,21
Azote (N) total		0,46	0,21
Matière organique		1,89	2,09
C/N	-	2,36	5,86
<b>Données chimiques, éléments échangeables et métaux</b>			
pH	-	9,23	8,70
CEC cobaltite xamine	cmol <sup>+</sup> .kg <sup>-1</sup>	35,80	49,90
Calcium (Ca)		15,20	20,60
Magnesium (Mg)		16,60	18,50
Sodium (Na)		11,90	17,90
Potassium (K)		1,16	0,63
Fer (Fe)		<0,05	<0,05
Manganèse (Mn)		<0,05	<0,05
Aluminium (Al)		0,04	0,04
Rapport (Na)/CEC		%	33,24
<b>Éléments totaux</b>			
Aluminium (Al)	g.100g <sup>-1</sup>	7,46	7,07
Calcium (Ca)		4,68	1,08
Fer (Fe)		2,88	1,96
Potassium (K)		1,79	0,85
Magnésium (Mg)		1,74	1,69
Sodium (Na)		1,09	1,09
Silicium (Si)		25,40	30,2
Manganèse (Mn)	mg.kg <sup>-1</sup>	640	251

Tableau 11 – Résultats d'analyses granulométrique et chimiques des deux échantillons 11 et 14 de bentonite de Mostaganem à l'état brut (Laboratoires INRA d'Arras)

### b. Bentonite de Maghnia

Les résultats granulométriques, organiques et chimiques des deux échantillons 1 et 2 de la bentonite de Maghnia sont présentés dans le tableau suivant :

Paramètres	Unité	Echantillon1	Echantillon2	
Données granulométriques				
Argile (< 2 µm)	g.kg <sup>-1</sup>	730	649	
Limons fins (2 – 20 µm)		104	132	
Limons grossiers (20 – 50 µm)		18	74	
Sables fins (50 – 200 µm)		16	70	
Sables grossiers (200 – 2000 µm)		132	75	
Données organiques				
Carbone organique	g.kg <sup>-1</sup>	1,08	0,22	
Azote (N) total		0,07	0,04	
C/N	-	14,30	4,88	
Matière organique	g.kg <sup>-1</sup>	1,87	0,38	
Données chimiques, éléments échangeables et métaux				
pH	-	8,62	9,37	
Calcaire (CaCO <sub>3</sub> ) total	g.kg <sup>-1</sup>	3,09	5,36	
CEC cobalthexamine	cmol <sup>+</sup> .kg <sup>-1</sup>	85,60	62,90	
Calcium (Ca)		32,50	11,30	
Magnésium (Mg)		29,40	23,60	
Sodium (Na)		24,60	38,10	
Potassium (K)		0,98	1,15	
Fer (Fe)		<0,05	<0,005	
Manganèse (Mn)		0,016	<0,005	
Aluminium (Al)		0,08	0,04	
Rapport (Na)/CEC		%	28,74	60,57
Eléments totaux				
Aluminium (Al)	g.100g <sup>-1</sup>	9,46	8,54	
Calcium (Ca)		0,80	0,42	
Fer (Fe)		1,21	1,75	
Potassium (K)		0,90	1,58	
Magnésium (Mg)		2,39	2,01	
Manganèse (Mn)	mg.kg <sup>-1</sup>	764	132	
Sodium (Na)	g.100g <sup>-1</sup>	0,78	1,19	
Silicium (Si)		28,40	30,80	

Tableau 12 – Résultats d’analyses granulométrique et chimiques des deux échantillons de bentonite de Maghnia à l’état brut (Laboratoires INRA d’Arras)

### II.2.2.3.2 Discussions des données minéralogique pour la fraction brute

Les résultats de l’analyse granulométrique montrent (Fig. 32), une fraction fine (< 2µm) plus importante dans les échantillons de la bentonite de Maghnia par rapport à ceux de Mostaganem. En revanche, l’évolution se présente inversement pour la fraction de 2 - 20 µm. Les autres classes granulométriques ne montrent pas des différences significatives entre les quatre échantillons.

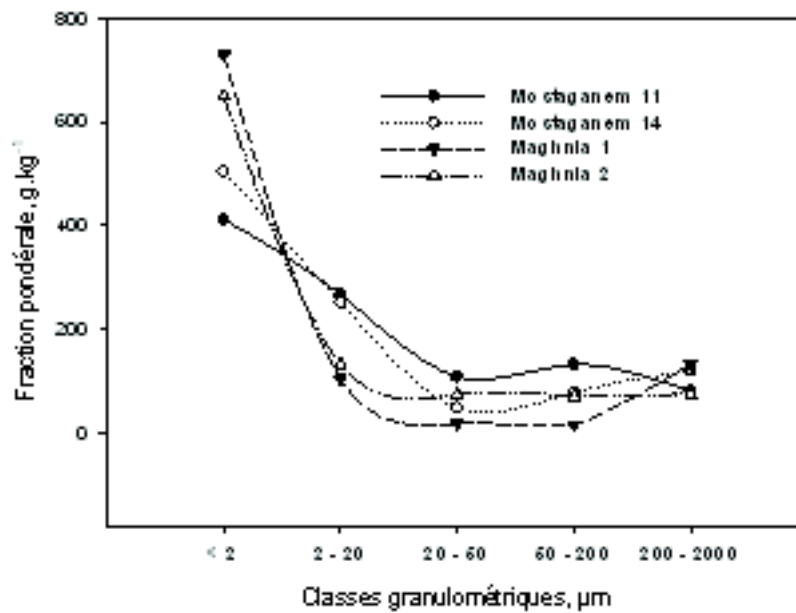


Fig. 31 – Résultats de l'analyse granulométrique des différents échantillons des deux bentonites

Les teneurs en matière organique sont globalement faibles pour tous les échantillons (Tableaux 7 et 8). Elles sont plus importantes dans les échantillons de Mostaganem. Pour ceux de Maghnia, l'échantillon 2 enregistre la teneur en matière organique la plus faible de 0,38%.

La teneur en carbone organique enregistre des valeurs très proches entre les échantillons à l'exception de celui de Maghnia 2 qui est le plus faible : 0,22 (Fig.33). La teneur en azote est globalement faible et est décroissante dans le sens de la présentation graphique : de Mostaganem 11 à Maghnia 2.

Le rapport C/N est faible (< 8) pour l'ensemble des échantillons ce qui est conforme à ce qu'on trouve habituellement dans les sols. Pour Maghnia 1, il est égal à 14,30, cela indique probablement la présence de matière organique grossière, très faiblement minéralisée qui pourrait être une pollution, peut être liée au process industriel.

Avec des pH respectifs de 8,7 et 8,6, les échantillons Mostaganem 14 et Maghnia 1 sont légèrement différents des deux autres de valeurs respectives de 9,2 et 9,4 (Fig.34). Ceci signifie peut être la présence de  $\text{CaCO}_3$  en faible proportion mais qui n'a pas été détectée avec les méthodes d'analyses. En outre, les échantillons de Maghnia possèdent des valeurs de la CEC respectivement de 85,60 et 62,90, donc plus élevées que ceux de Mostaganem, respectivement 35,80 et 49,90, confirmant ainsi les données granulométriques du matériau brut.

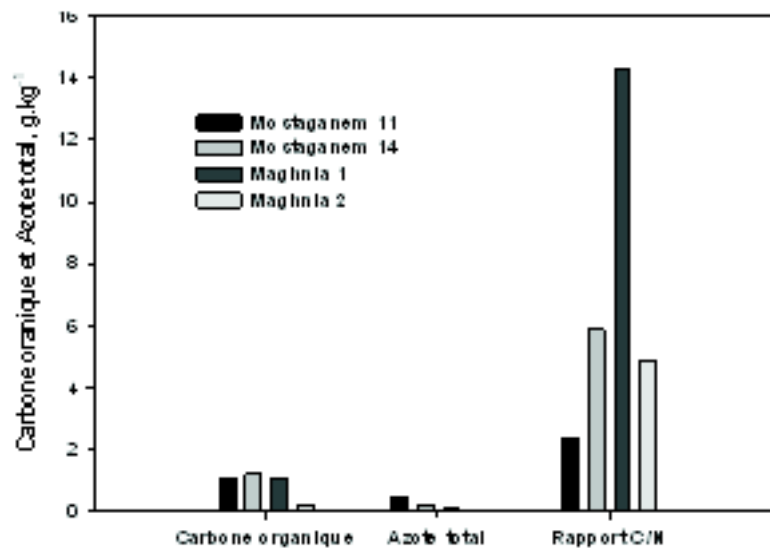


Fig. 32 – Carbone organique, azote total et rapport C/N des échantillons des deux bentonites

Les proportions des différents cations échangeables sont environ de 1/3 pour Na, Mg et Ca. Cependant les proportions varient légèrement d'un gisement à l'autre. Naturellement la teneur en chaque élément est fonction de la CEC. Le fait d'avoir une plus forte teneur en sodium peut être un inconvénient vis à vis de la stabilité structurale du matériau en présence d'eau. Ceci sera discuté plus loin.

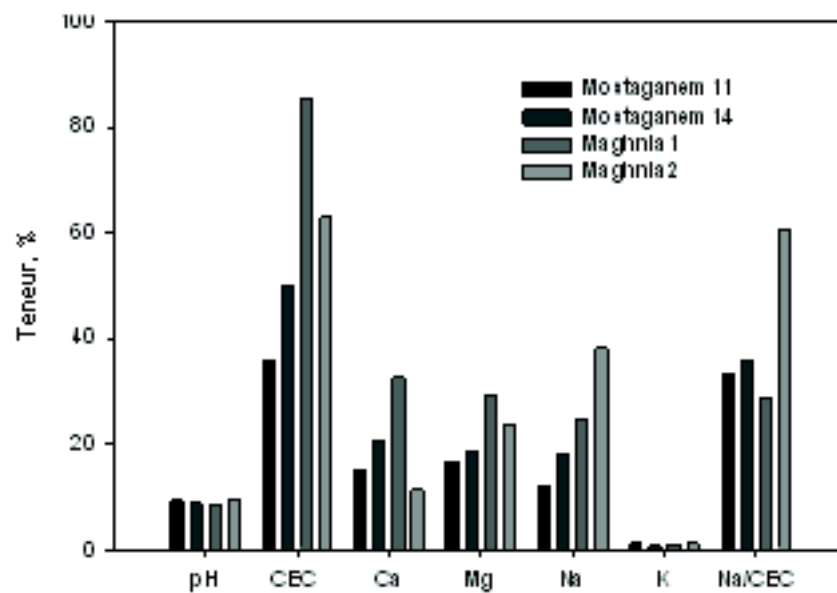


Fig. 33 – Résultats chimiques des échantillons des deux bentonites brutes

En résumé, il est important de mettre en évidence deux remarques qui nous semblent pertinentes. La première est que l'échantillon 1 de la bentonite de Maghnia présente les propriétés les plus intéressantes par le fait qu'il enregistre les caractéristiques suivantes :

Les plus fortes teneurs en fraction < 2 µm et (200-2000) µm

La valeur de la CEC la plus élevée

Les taux et teneurs en Ca et Mg les plus élevées

La valeur du taux de saturation par le sodium (Na/CEC) la plus faible

La valeur du pH la plus faible

Si l'on voulait sur la base de ces critères, établir un classement des échantillons d'argile allant de 1 à 4, nous obtiendrons (Tableau 13), leur classement en considérant le total dans le sens croissant. Ceci entraîne l'ordre : Maghnia 1, Mostaganem 14 et enfin Maghnia 2 avec Mostaganem 11 au même rang.

**Tableau 13 – Classement par ordre de propriétés favorables des quatre échantillons de bentonite étudiés**

Critères	Position de l'échantillon dans le classement			
	Mostaganem 11	Mostaganem 14	Maghnia 1	Maghnia 2
Fractions (< 2)	4	3	1	2
pH	3	2	1	4
CEC	4	3	1	2
Teneurs Ca et Mg	3	2	1	4
Taux Na/CEC	2	3	1	4
Total	16	13	5	16

La seconde remarque concerne les résultats d'une comparaison entre les échantillons d'argile de Mostaganem utilisés par Halilat (1998) et ceux que nous avons utilisé. Il en ressort, que les échantillons utilisés par l'auteur sont extrêmement proches de ceux de Mostaganem 14 que nous avons analysé.

Ces deux remarques nous amènent à caractériser la fraction inférieure à 2 µm des deux échantillons qui rassemblent les propriétés les plus intéressantes pour la bonification des sols sableux parmi ceux étudiés jusqu'à présent pour les deux gisements de Mostaganem et de Maghnia.

### II.2.2.3.3 Fraction inférieure à 2 µm

Les résultats des analyses des deux bentonites de Maghnia et de Mostaganem respectivement pour les échantillons 1 et 14 saturés à l'aide d'une solution de NaCl 1 M sont présentés dans le tableau suivant :

Paramètres	Unité	Echantillon 1 Maghnia	Echantillon 14 Mostaganem
Humidité	g.kg <sup>-1</sup>	104	99,2
Données organiques			
Carbone total	g.kg <sup>-1</sup>	0,65	0,75
Azote (N) total		0,10	0,13
Données chimiques, éléments échangeables et métaux			
CEC cobaltihexamine	cmol <sup>+</sup> .kg <sup>-1</sup>	103	85,2
Calcium (Ca)		2,49	3,63
Magnésium (Mg)		5,17	3,27
Sodium (Na)		88,4	77,5
Potassium (K)		0,58	0,9
Fer (Fe)		<0,005	<0,005
Manganèse (Mn)		0,08	0,04
Aluminium (Al)		<0,02	0,04
Rapport (Na)/CEC	%	85,83	90,96
Eléments totaux			
Aluminium (Al)	g.100g <sup>-1</sup>	9,97	8,59
Calcium (Ca)		0,06	0,09
Fer (Fe)		1,23	1,63
Potassium (K)		0,16	0,22
Magnésium (Mg)		2,46	2,22
Sodium (Na)		2,12	1,90
Silicium (Si)		25,10	28,40
Manganèse (Mn)	mg.kg <sup>-1</sup>	200	141

Tableau 14 – Résultats d'analyses granulométrique et chimiques de la fraction inférieure à 2 µm des échantillons 1 et 11 de bentonite respectivement de Maghnia et de Mostaganem (Laboratoires INRA d'Arras)

#### II.2.2.3.4 Discussions des données minéralogiques pour la fraction < 2µm

La figure 35 résume la comparaison entre les deux bentonites de Maghnia 1 et de Mostaganem 14 selon les critères les plus déterminants dans l'amélioration des propriétés de fertilité des sols sableux. Ainsi l'humidité et la CEC sont plus importantes pour Maghnia 1 que pour Mostaganem 14. Ceci est aussi valable pour les teneurs en Mg et Na contrairement à celles en Ca et K qui sont plus élevées pour Mostaganem 14. C'est le rapport Na/CEC qui représente une importance par le fait qu'il caractérise l'ampleur du caractère sodique de l'argile. Il apparaît donc, que la bentonite de Maghnia est plus intéressante à tout égard et peut par conséquent, constituer l'argile avec laquelle il est possible d'améliorer de manière efficiente un sol sableux car autant l'aspect écologique est déterminant dans tout développement durable, autant il faut prendre en compte le coût de l'amendement par rapport aux gains qu'il engendre à court et moyen terme.



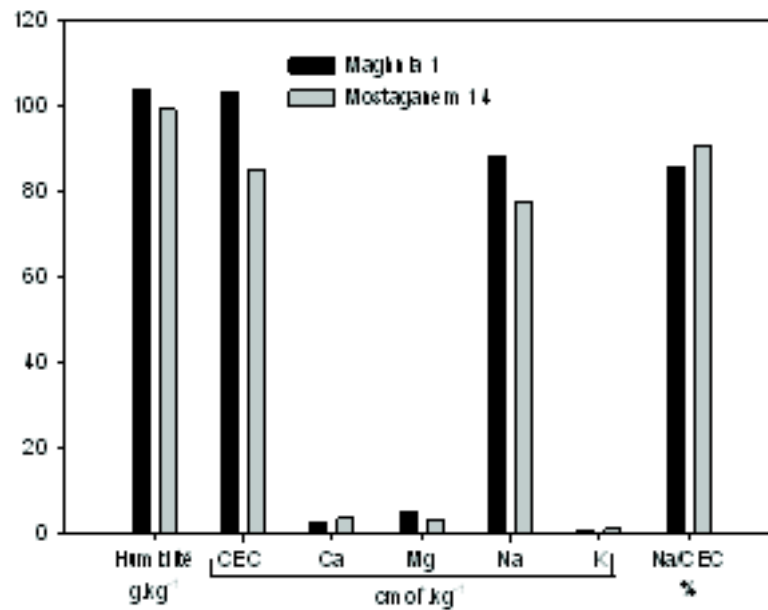


Fig. 34 – Résultats chimiques des échantillons < 2µm des deux bentonites de Maghnia et de Mostaganem

En résumé, il est important de noter que les propriétés des argiles de gisements varient en fonction du lieu de prélèvement. Nous devons en tenir compte dans l'utilisation des argiles, ou optimiser les doses afin de se placer dans les conditions les plus favorables, notamment en tenant compte d'aspects importants comme le taux de sodium échangeable du matériau naturel dont nous verrons qu'il a une grande importance dans les propriétés du mélange avec le sable.

### II.2.2.3.5 Formules structurales

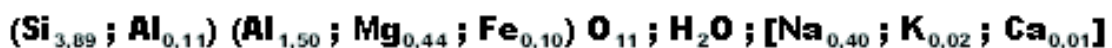
Elles ont été calculées sur la base de 11 oxygènes par demi maille sur la fraction < 2 µm préparée Na. Les formules structurales obtenues sont :

#### Bentonite de Mostaganem (C<sub>14</sub>)



La bentonite de Mostaganem présente une charge tétraédrique nulle. La charge du feuillet est de 0,43, donc d'origine totalement octaédrique. Elle ressemble à d'autres montmorillonites comme celle de Camp Berteau ( *Pintore et al.*, 2001 ). La question qui est posée à ce niveau est de savoir si la petite différence de localisation de la charge du feuillet est susceptible d'orienter les propriétés de l'argile dans le mélange argile-sable.

#### Bentonite de Maghnia (Echantillon 1)



La formule structurale montre que la montmorillonite de Maghnia est une beidellite puisqu'elle possède une charge tétraédrique de 0,11. Similaire à celle de Mostaganem, elle

présente une charge totale du feuillet de 0,44. Cette argile est à tendance beidellitique et ressemble beaucoup à la montmorillonite du Wyoming. On notera que l'échange Na-Ca a été correctement effectué puisque la teneur en Ca est de 0,01 par demi-maille. L'argile ne contient pratiquement pas d'illite puisque la teneur en K est très faible.

### **II.2.2.4 Microscopie électronique à transmission (MET)**

Les images de microscopie électronique à transmission permettent de mettre en relief l'organisation de l'argile. Dans ce cas nous avons extrait la fraction  $< 2 \mu\text{m}$  pour les deux échantillons de bentonite. Le protocole est celui décrit par Tessier (1984) et Elsass et al. (2002). Des échantillons hydratés sont préparés à un potentiel donné de l'eau. Les échantillons sont placés au contact d'oxyde de propylène de façon à remplacer l'eau par ce solvant. Ce solvant est miscible dans une résine epoxy de Spurr (1969). Après imprégnation dans cette résine les échantillons sont portés à  $60^\circ\text{C}$  pendant 24 heures pour permettre sa polymérisation. Des coupes sont ensuite effectuées avec un ultramicrotome équipé d'un couteau de diamant. Une autre alternative de la méthode est le dépôt d'une suspension d'argile diluée sur une grille qui peut être examinée directement après séchage à l'air.

L'exploitation des images MET (Photo 2), permet d'estimer l'organisation des argiles, ce qui inclut la taille des agrégats des particules, leur arrangement mutuel, la taille des particules élémentaires et la distance entre les feuillets des argiles en haute résolution.

#### **II.2.2.4.1 Bentonite de Mostaganem**

Dans un but de compléter d'autres travaux et d'en éviter la répétition, nous n'avons pas analysé au MET les échantillons de la bentonite de Mostaganem car nous considérons que sur ce plan, les résultats de Halilat (1998) ont suffisamment caractérisé cette argile bien qu'ils concernent des mélanges avec un sable relativement différent de ceux que nous avons utilisé dans la présente étude. Cela nous permettra de comparer nos résultats avec ceux obtenus par l'auteur.

#### **II.2.2.4.2 Bentonite de Maghnia**

Nous commençons dans un premier temps par analyser ces images obtenues après ultramicrotomie sur lesquelles (Photo 2), nous remarquons la présence de particules de tailles diverses. On note la présence d'agrégats de bentonite (couleur foncée). Leur taille est variable ce qui fait qu'on a des agrégats d'environ  $10 \mu\text{m}$  jusqu'à des particules très petites. Il est donc clair que le matériau ainsi préparé n'est en aucun cas à base de particules élémentaires. Il s'avère qu'il n'est pas possible de disperser le matériau complètement. Autrement dit, dans le mélange sable-bentonite, l'argile se présente sous différentes textures : certaines particules sont des argiles au sens où nous les entendons habituellement, c'est à dire fortement aptes à se disperser. Les autres sont des agrégats analogues aux sables et limons mais ayant des propriétés particulières vis à vis de l'eau puisque susceptibles de gonfler et se rétracter en fonction des conditions hydriques. Il est à noter que l'application de la loi de Stokes à ce genre de matériau pose problème puisqu'une bonne partie de l'argile se trouve sous forme agrégée, très difficilement dispersable. Cet aspect peut être intéressant concernant les phénomènes d'entraînement de particules dans les sols. On notera que l'argile de Maghnia 2 est beaucoup plus finement dispersée que l'argile de Maghnia 1.



Photo 2 – Observation au MET de la fraction  $<2\mu\text{m}$  de la bentonite de Maghnia a. échantillon 1, b. échantillon 2, x 4900

L'analyse approfondie par traitement d'images à l'aide du logiciel ImageJ montre effectivement, (Fig. 36), que la distribution de la taille des agrégats de l'échantillon 1, est relativement beaucoup plus étalée que pour l'échantillon 2. De plus les agrégats de la gamme de surfaces comprises entre 2 et  $25\mu\text{m}^2$  sont bien plus élevés pour l'échantillon 1.

Si nous passons à un grossissement plus grand de 24 000 (Photo 3), nous remarquons que les espaces à couleur blanche représentent le vide qui exprime relativement la porosité de la fraction colloïdale. Ceci nous amène à estimer en pourcentage, la part de la porosité par rapport à la surface totale de plusieurs agrégats pour les deux échantillons de bentonite. Cette estimation est rendue possible par le logiciel ImageJ de manière simple et assez précise.

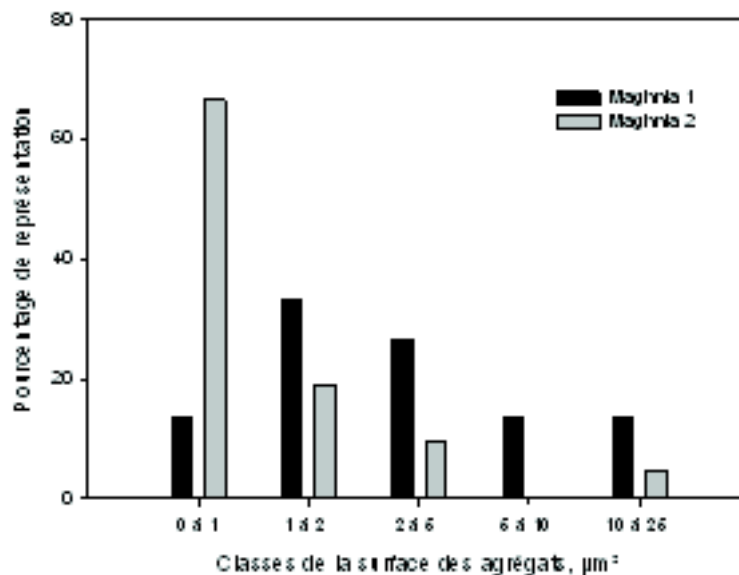


Fig. 35 – Distribution de la surface des agrégats de la bentonite de Maghnia

En effet, il apparaît en moyenne que la porosité est de 42,4 et 29,2 % respectivement pour les échantillons 1 et 2 de cette bentonite. Ceci peut être expliqué par les agrégats de grandes tailles qui caractérisent l'argile de Maghnia 1 et qui sont à l'origine de sa porosité élevée étant donné qu'il s'agit d'agrégats difficilement dispersables mais à travers lesquels se développe une bonne partie de la porosité vu qu'ils se trouvent dans la fraction  $<2\mu\text{m}$ .

Il est utile de rappeler que la porosité dans ce cas est essentiellement sous forme de microporosité puisque nous discutons la fraction de la bentonite  $< 2\mu\text{m}$ .

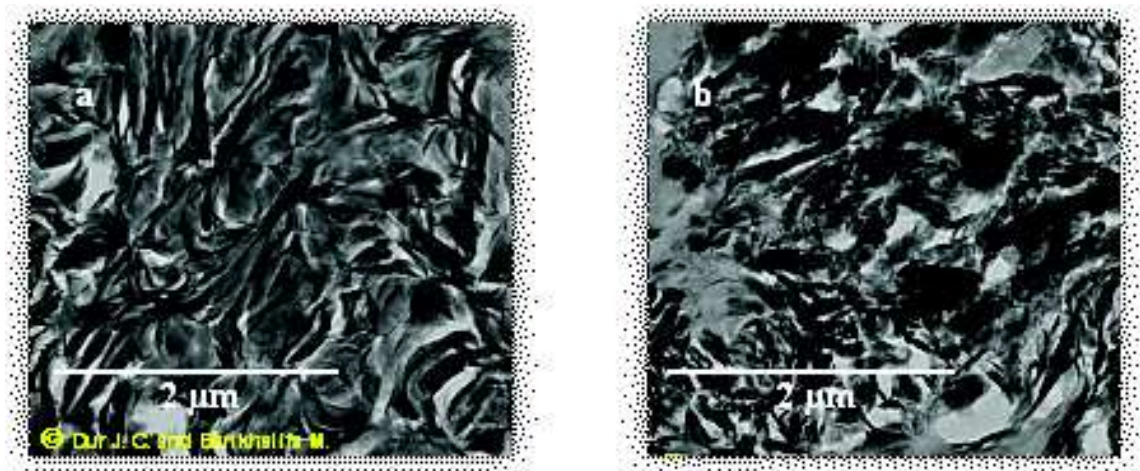


Photo 3 – Observation au MET de la fraction  $< 2\mu\text{m}$  de la bentonite de Maghnia a. échantillon 1, b. échantillon 2, x 24000

### II.3 Discussions et conclusion

Quand il s'agit de l'amélioration des propriétés physiques des sols sableux par ajout de bentonite, la première donnée à prendre en compte est l'origine du sable lui-même. La caractérisation de ce dernier permet, de prime abord, de prévoir son effet sur le comportement physique du mélange. Malgré son caractère inerte, le sable oriente en grande partie les propriétés du mélange avec la bentonite notamment quand il est soumis aux contraintes de salinité et de sodicité. En effet, la comparaison des deux sables que nous avons étudiés sur les plans de la forme, la sphéricité, l'arrondi et l'état de surface par rapport à celui utilisé par Halilat (1998), montre que la texture et le coefficient d'uniformité sont deux paramètres de caractérisation importants des sables.

Il faut rappeler que la nature du sable est un paramètre de l'équation d'amendement en bentonite non modifiable. En revanche, il est possible d'adapter le choix de la bentonite en fonction des caractéristiques du sable à bonifier. La caractérisation de l'argile (minéralogie) est donc un préalable à ce choix qui constitue un paramètre important d'optimisation des propriétés de gonflement et d'hydratation du mélange. La question de l'amendement n'est donc pas simple et nécessite une appréhension précise du sol sableux et de la nature de la bentonite pour prédire leurs effets sur les propriétés du mélange. Il en découle qu'on ne peut généraliser les résultats d'une étude expérimentale de bentonisation à d'autres situations similaires sans une analyse précise des deux composantes du mélange. Il s'agit donc de donner les outils d'une telle analyse en vue de l'optimisation du mélange sur le plan agronomique.

Dans ce chapitre, nous avons vu que la caractérisation de l'argile se fait à plusieurs niveaux :

Dans l'analyse au diffraction des rayons X, nous avons étudié deux échantillons de bentonite pour chacun des deux gisements de Maghnia et de Mostaganem. Les résultats montrent que dans les quatre cas, il s'agit d'une smectite. Néanmoins, il est important de

relever des différences entre les caractéristiques des échantillons liées essentiellement au prélèvement. Cela veut dire qu'au sein même d'un gisement d'argile, on peut trouver des différences de propriétés entre prélèvements effectués en temps et en lieux différents. Comme la bentonite est utilisée sous sa forme naturelle, nous avons effectué les analyses sur la fraction brute et la fraction  $< 2 \mu\text{m}$ . La texture est un aspect important de l'amendement du fait qu'elle peut limiter ou favoriser la migration de l'argile.

L'analyse minéralogique sur les fractions brutes montre que sur la base de critères pertinents tels que la CEC et le rapport Na/CEC, l'échantillon Maghnia 1 est le plus intéressant pour l'amélioration des sols sableux suivi de celui de Mostaganem 14. A priori l'analyse de la fraction  $< 2 \mu\text{m}$  de ces deux derniers échantillons, révèle que la bentonite utilisée par Halilat (1998) provient vraisemblablement de la couche n° 14 du gisement de Mostaganem.

L'analyse microscopique à transmission (MET), montre que la bentonite de Maghnia 1, se présente sous forme d'agrégats de dimensions variables pouvant atteindre  $10 \mu\text{m}$ . Dans ce cas de figure, la loi de Stokes prévoit que la densité d'une particule est faible même si sa taille est importante étant donné qu'il s'agit de la fraction de l'échantillon  $< 2 \mu\text{m}$ . Cela voudra dire que la particule est très poreuse et par voie de conséquence requiert un grand pouvoir d'hydratation. Néanmoins on ne sait pas si cette agrégation influence ou non le gonflement. Le fait d'utiliser l'argile sous sa forme brute, pour des raisons de coût, est en lui-même un avantage à cause de sa forme agrégée qui doit avoir un rôle déterminant sur sa migration dans le mélange.

En zones arides et semi arides, les caractéristiques physico-chimiques des matériaux constituant le mélange orientent ses propriétés sous les effets des contraintes abiotiques de salinité et de sodicité. Ainsi, les argiles par leur caractère basique sont susceptibles d'optimiser la présence de charge aux hautes valeurs du pH. L'origine sodique de la bentonite est également un facteur important car la présence du Na doit être prise en compte dans la gestion des eaux notamment en l'absence de  $\text{CaCO}_3$  dans le milieu.

Toutes ces considérations ont leurs effets sur les propriétés d'hydratation et de gonflement des mélanges qui déterminent leurs propriétés hydriques. C'est pourquoi nous allons évaluer dans le prochain chapitre les caractéristiques hydriques des différents mélanges sable-bentonite en fonction du potentiel matriciel, de la salinité et de la sodicité. Elles vont permettre de répondre aux questions posées.

## Chapitre III Etude des propriétés d'hydratation des mélanges en fonction de la dose de bentonite, du potentiel matriciel (pF) et de la salinité/sodicité

A travers l'étude précédente, nous avons constaté que les caractéristiques des matériaux que nous utilisons dans la présente étude : les sables et la bentonite, dépendent des caractéristiques des argiles ainsi que des conditions de leurs prélèvements. Cela peut affecter indéniablement, les propriétés de leurs mélanges et nous sommes amenés, de toute évidence, à aborder l'étude du comportement de ces substrats vis-à-vis des contraintes hydriques et abiotiques auxquelles ils sont soumis dans le milieu naturel. Nous entendons par contraintes hydriques, les processus d'humectation et de dessiccation et par contraintes abiotiques les phénomènes de salinité et de sodicité. Il est connu que dans les zones arides et semi arides, les processus de dessiccation, de salinisation et de sodisation évoluent à des seuils autant élevés qu'il est important d'en connaître les répercussions sur les propriétés de l'association sable-bentonite. La rétention en eau des mélanges est la principale question que nous abordons dans ce chapitre en raison de son importance comme contrainte environnementale. En réalité, les contraintes environnementales subies par la plante dans le cas des zones arides et semi-arides, se manifestent par l'interaction de l'aridité (stress hydrique et thermique) et de la salinité/sodicité (pression osmotique ; toxicité des ions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$  et  $\text{Cl}^-$ ). Nous rappelons que le stress hydrique occupe une place particulière du fait de sa fréquence d'occurrence et de la place qu'occupe l'eau dans les phénomènes métaboliques. Les sols à texture sableuse qui se développent principalement dans ces régions suite à des processus d'altération caractéristiques des climats secs demeurent les plus touchés. C'est pour cela que nous abordons, dans ce chapitre, deux grands volets :

- le premier est consacré à l'étude des propriétés d'hydratation des mélanges sable bentonite soumis au seul stress hydrique. Cet aspect hydrique mérite une attention toute particulière pour comprendre les interactions du mélange sable-bentonite vis à vis de l'eau car la quantité d'eau que peut stocker un sol n'a aucune importance si elle n'est pas considérée en même temps que la pression de succion (potentiel matriciel) à laquelle est cédée l'eau aux racines. Les racines ayant une force de succion limitée, ne peuvent extraire l'eau au delà d'une certaine valeur du potentiel que l'on estime généralement à 1600 kPa, mais qui peut dans certains cas aller jusqu'à 40 atmosphères. Le potentiel capillaire de l'eau dans le sol augmente quand sa teneur en argile augmente et quand son humidité diminue. C'est pourquoi, nous abordons par la suite, un autre aspect tout aussi important, qui concerne l'effet que pourrait avoir la variante texture du sable sur les propriétés des mélanges. Pour cela nous utilisons les deux sables 1 et 2 (§ chap II, p. 39) dans les mélanges de texture respectives fine et grossière.

- le second volet est réservé à l'étude des propriétés d'hydratation des mélanges soumis aux deux contraintes abiotiques de salinité et de sodicité. Dans ce cas, le substrat est

soumis à un stress salin/sodique. Autrement dit, c'est le potentiel osmotique qui se manifeste et que nous allons contrôler par deux données caractéristiques de la salinité et de la sodicité, qui sont respectivement : la concentration en sels et le SAR. Il est connu que, la salinité et la sodicité sont les contraintes abiotiques incontournables dans les milieux arides et semi arides qui causent des baisses de rendements fatales à l'agriculture en Algérie et dans le monde. Elles sont également, à l'origine de la dégradation physique de grandes étendues agricoles jadis productives qui parfois deviennent irrécupérables pour l'agriculture. Le problème de la salinité/sodicité est complexe et demande une gestion rigoureuse du milieu. Encore faut-il poser les bases scientifiques qui régissent le comportement hydrique de l'association sable-bentonite soumise à ces contraintes, en vue d'optimiser son application dans le terrain. C'est à cette question que nous essayons de contribuer à travers ce second volet du chapitre III.

## III.1 Etude des propriétés d'hydratation des mélanges en fonction de la dose de bentonite et du potentiel matriciel (pF)

### Introduction

---

Dans un premier temps l'accent est mis particulièrement sur les propriétés d'hydratation des mélanges sables-argile en fonction du potentiel matriciel. Il est connu que sous l'effet d'une forte évaporation, le sol est soumis au phénomène de dessèchement qui se manifeste par une augmentation de l'énergie mise en jeu par sa matrice pour retenir l'eau. Cette énergie exprimée sous forme de potentiel matriciel est la quantité que doit développer la plante pour extraire l'eau nécessaire à sa croissance. En conditions d'aridité sévère, le sol n'est pas toujours complètement sec, mais c'est la valeur du potentiel matriciel qui stresse la plante et peut même parfois la mettre en situation de flétrissement ( $pF = 4,2$ ).

C'est pourquoi, nous allons étudier dans cette partie du chapitre III, les effets de la bentonite et du sable sur les propriétés d'hydratations du mélange soumis à des potentiels matriciels croissants. Cette approche va être développée pour deux textures du sable, l'une fine et l'autre grossière.

### III.1.1 Matériels et méthodes

---

#### III.1.1.1 Dispositif expérimental

Avec les deux sables 1 et 2 précédemment caractérisés et la bentonite de Maghnia échantillon 1 (chapitre II), on réalise à sec après passage à l'étuve à 105°C pendant 24 heures, une série de mélanges de 0, 5, 10, 20, 50 et 100 % d'argile (Tableau 15).

		Dose de bentonite, %					
		0	5	10	20	50	100
Poids, g	Sable	200	190	180	160	100	0
	Bentonite	0	10	20	40	100	200

Tableau 15 – Poids relatifs du sable et de la bentonite dans les mélanges

Le mélange est soigneusement préparé manuellement de manière à garder au maximum son homogénéité, puis transvasé dans des anneaux cylindriques spécialement conçus pour un emplacement adéquat sur des plaques céramiques d'un dispositif de marmite de Richards (Photo 4). Avant de prendre la mesure de la teneur en eau, les échantillons sont placés sur la plaque et mis en contact d'une solution d'eau distillée pendant 18 heures en vue de leur saturation en eau.

Toutes les mesures sont répétées sur trois échantillons conformément au dispositif des blocs complets aléatoires.

### III.1.1.2 Teneur en eau en fonction du pF

Pour la mesure de la teneur en eau en fonction des pF, nous avons utilisé le dispositif de la marmite de Richards (Photo 4). Il est constitué d'une chambre d'extraction

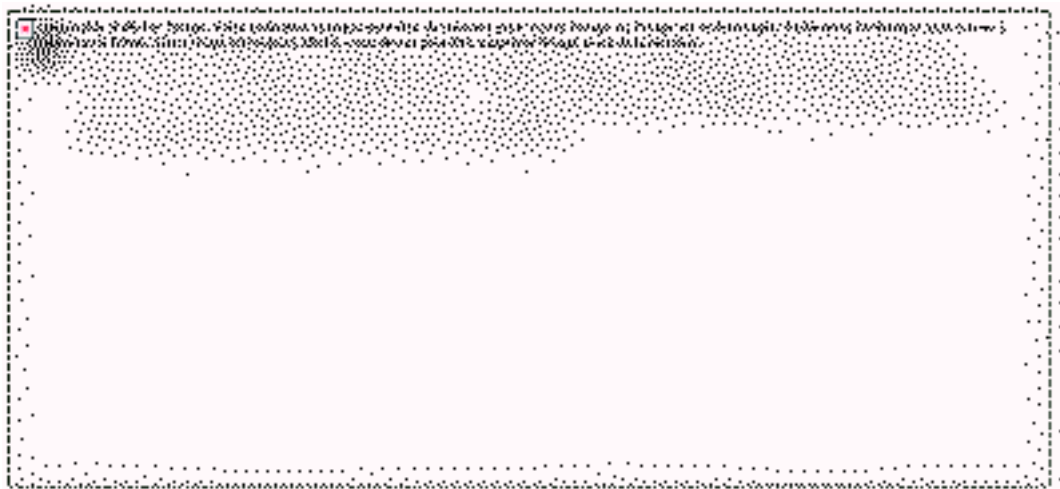


Photo 4 – Dispositif de mesure de la teneur en eau en fonction du pF (Appareil de Richards)

dont le couvercle est pourvu d'un ajustage pour l'arrivée d'air comprimé au moyen d'un tuyau comportant un manomètre. Sa fermeture hermétique est assurée par un jeu de boulon de serrage.

A l'intérieur de la marmite, se trouvent des supports à crémaillère destinés à l'emplacement des plaques poreuses au dessous desquelles se trouvent des membranes en caoutchouc. L'évacuation de l'eau distillée s'effectue par l'intermédiaire d'une conduite placée dans la plaque poreuse.



### III.1.2 Résultats et discussions

#### III.1.2.1 Evolution de la teneur en fonction des pF

Il apparaît globalement que plus la teneur en argile est importante, plus la rétention de l'eau par le mélange est forte (Fig. 1). Les variations de la teneur en eau suite à l'augmentation de la dose d'argile par rapport au témoin (sable pur) se distinguent en deux lots. Le premier lot se caractérise par des variations relativement faibles, il concerne les mélanges à 5 et 10 % de bentonite. En revanche, les variations du second lot sont plus importantes et concernent les mélanges à 20, 50 et 100 % de bentonite. Les analyses statistiques effectuées pour la teneur en eau pour les différentes doses d'argile et pour toute la gamme des potentiels hydriques révèlent que les variations des teneurs en eau sont hautement significatives.

Une comparaison horizontale entre les deux sables, montre qu'à dose d'argile égale, les teneurs en eau enregistrées pour le sable 1 sont relativement plus importantes que celles liées au sable 2. Notons que pour l'argile brute, les courbes enregistrent des différences insignifiantes, ce qui est évident étant donné qu'il s'agit du comportement propre à l'argile.

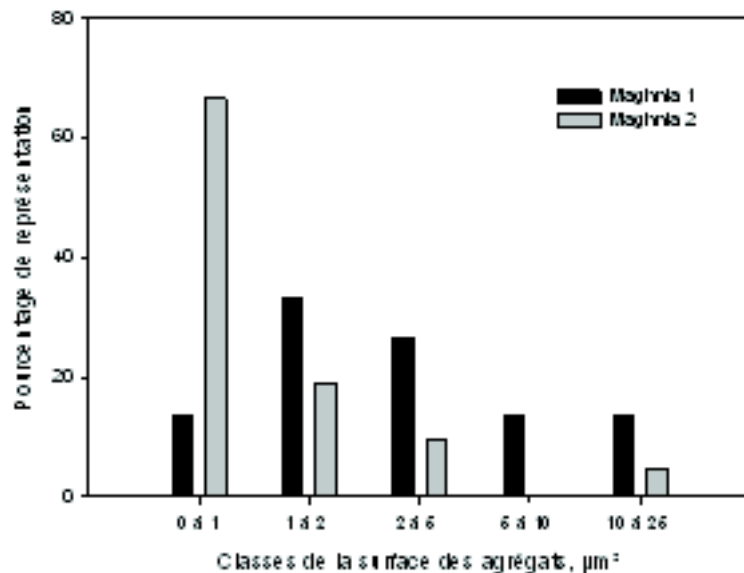


Fig. 36– Evolution de la teneur en eau des mélanges au contact de l'eau distillée en fonction de la dose d'argile à divers potentiels matriciels exprimés en pF pour les deux sables

C'est dans le reste des mélanges, que nous pouvons déceler l'effet de la nature du sable. Dans le tableau 16, nous avons résumé en fonction de la dose d'argile et de la valeur du potentiel de l'eau, le sable pour lequel nous avons obtenu la plus grande valeur de la teneur en eau dans la figure 37. En effet, pour le sable pur et la dose de 5 % d'argile (95 % de sable), les teneurs en eau pour le sable fin sont toutes supérieures à celles liées au sable grossier pour la gamme complète des pF. Cela est vraisemblablement lié à la texture du sable 1 plus fine que le sable 2. Ce tableau montre que pour les doses de 10, 20 et 50 %, l'effet du sable est insignifiant aux pF 4 et 4,2[2]. Dans ce cas, l'effet propre de l'argile commence à se manifester par une rétention importante pour cette gamme de pF même quand il s'agit du sable 2 le plus grossier. A ce niveau se pose la question du rôle du sable aux forts potentiels matriciels. Cet aspect sera discuté plus loin lorsque nous verrons l'évolution du rapport

(  $\frac{\text{Teneur eau}}{\text{Dose de bentonite}}$  ) en fonction des pF (Sous chapitre suivant).

Si nous revenons à la courbe précédente, il apparaît que les sables initialement saturés perdent le maximum de leur eau au seuil du pF 2 (pression = -10 kPa). Ceci est lié à la présence d'une macroporosité qui est déjà vidée de l'essentiel de son eau et qui correspond, conformément à la loi de Jurin-Laplace, aux pores supérieurs à 15µm (Tessier, 1984). Ce qui explique les teneurs élevées pour le sable 1 par rapport au sable 2.

Tableau 16 – Sable (1 ou 2) pour lequel la valeur de la teneur en eau est supérieure en fonction de la dose de bentonite et de la valeur du pF

Dose d'argile, %	Valeurs des pF					
	2	2,5	2,7	3	4	4,2
50	Sable 1	Sable 1	Sable 1	Sable 1	=	Sable 2
20	Sable 1	Sable 1	Sable 1	Sable 1	=	Sable 2
10	Sable 1	Sable 1	Sable 1	Sable 1	Sable 2	Sable 2
5	Sable 1	Sable 1	Sable 1	Sable 1	Sable 1	=
0	Sable 1	Sable 1	Sable 1	Sable 1	Sable 1	Sable 1

= les valeurs sont proches pour les deux sables

Une situation analogue se présente pour les mélanges à 5 et 10% d'argile mais à un degré moindre. En effet, Chrétien (1986) a montré que les échantillons d'horizons sableux sont caractérisés par une très grande macroporosité. Ils possèdent par conséquent, très peu de micro et méso porosité. Par rapport à des résultats analogues obtenus par Assouline et al. (1998) sur des échantillons sableux, notre analyse des sables 1 et 2, nous permet de mettre en évidence que les propriétés des sables s'expriment principalement aux faibles teneurs en bentonite. Dans ce cas, il s'agit d'une bonne expression du caractère sableux des mélanges.

Pour le mélange à 20% d'argile, l'inflexion des courbes commence à -100 kPa (pF = 3). Nous en déduisons que le remplissage de l'espace poral du sable par l'apport d'une dose plus grande d'argile est plus important. Il ressort donc que l'argile détermine le spectre poral du sable dans le sens d'un accroissement de son énergie de rétention en eau. Des constatations analogues ont été rapportées par Chrétien (1986) et Bruand et al. (1988).

Pour les mélanges à 50 et 100% d'argile, la forme des courbes de la teneur en eau montre qu'il s'agit d'un matériau qui a une grande capacité à retenir l'eau. Ces deux courbes sont relativement régulières jusqu'à -100 kPa où elles prennent une allure plus décroissante. Entre pF 3 (-100 kPa) et pF 4,2 (-1600 kPa), le mélange à 50% et la bentonite pure perdent plus de 40% de leur eau par rapport au pF 2,5 (-33 kPa), ce qui traduit une sensibilité caractéristique de l'argile dans ce domaine de contrainte. Cette gamme de pF correspond, à juste titre, à la frange du stress hydrique rencontrée généralement par les plantes en régions arides et semi arides. Quel serait alors dans ce cas, le rôle de la texture du sable ? Cette question nous renvoie au sous chapitre suivant où nous analyserons l'importance relative de la phase argileuse et du sable sur les propriétés d'hydratation des mélanges.

### III.1.3 Importance relative de la nature du sable par rapport à la phase argileuse dans la rétention en eau du mélange

Il est possible de recourir à une autre voie d'interprétation des résultats qui consiste à émettre l'hypothèse que l'argile détermine la rétention de l'eau. Dans ce cas nous considérons la teneur en eau rapportée à la teneur en argile

$$W/A = \left( \frac{\text{Teneur eau}}{\text{Dose de bentonite}} \right)$$

ce qui permet une comparaison plus pertinente entre les différents mélanges pour les deux sables. La teneur en eau rapportée à la dose d'argile W/A, montre de prime abord, une nette différence de comportement des mélanges entre les deux sables (Fig. 38).

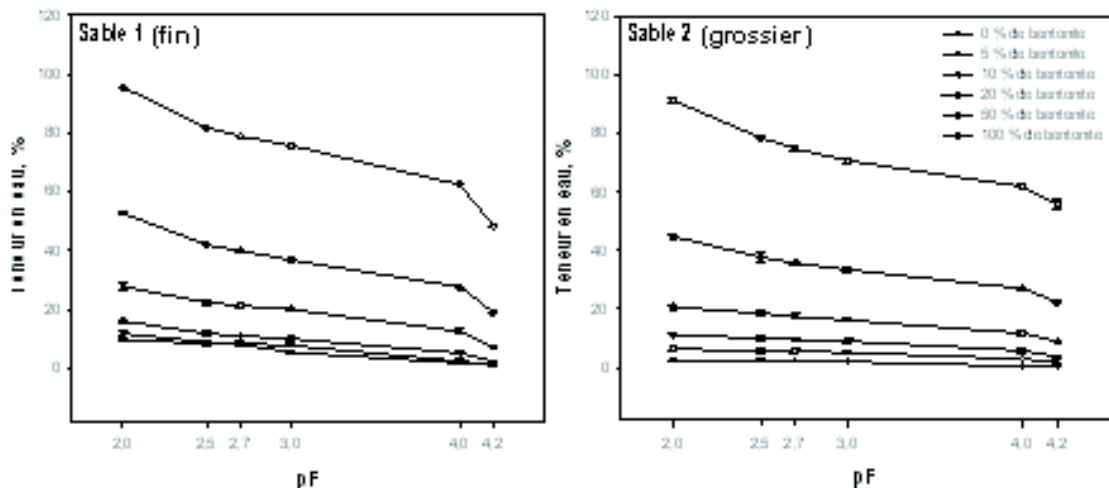


Fig. 37– Effet de la texture du sable sur la teneur en eau de l'argile

En effet, il apparaît que pour les potentiels d'eau inférieurs à (-1000 kPa ; à gauche du pF 4), le rapport W/A des mélanges avec le sable 1 est plus élevé que celui de la bentonite pure. Ce qui dénote que dans ce cas, l'argile n'explique pas à elle seule la teneur en eau des échantillons. Son influence est d'autant plus restreinte que la proportion en sable est élevée. En revanche, aux forts potentiels (à droite du pF 4), la bentonite explique l'essentiel de la rétention de l'eau.

Pour le sable 2, la situation évolue de manière similaire mais en proportion plus faible. Ce qui montre un rôle beaucoup plus restreint du sable 2 par rapport au précédent plus fin sur les propriétés d'hydratation des mélanges.

En somme, il est possible de schématiser l'évolution du W/A en fonction du pF et de la dose d'argile pour deux sables l'un de texture grossière et l'autre fine (Fig. 39), afin de comprendre l'effet relatif du sable par rapport à la fraction argileuse.

Il en ressort, que l'argile se comporte de deux manières distinctes selon l'importance de sa teneur dans le mélange et en fonction du potentiel matriciel du milieu. A faible teneur, son rôle est limité car c'est le sable qui retient l'essentiel de l'eau. Néanmoins, aux forts potentiels de l'eau (< -1000 kPa), c'est l'argile qui gouverne les propriétés d'hydratation des mélanges.

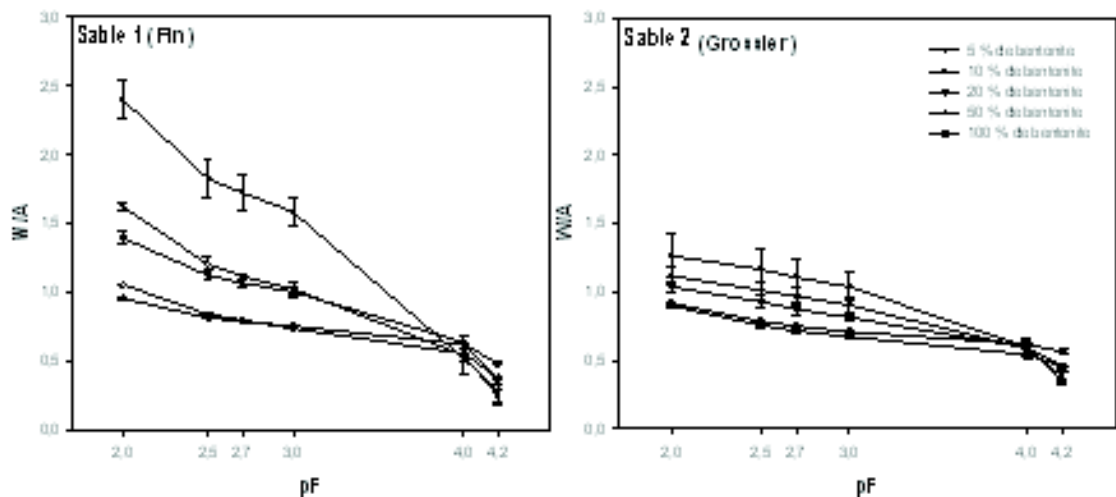


Fig. 38 – Schéma de l'évolution du coefficient W/A des mélanges sable-bentonite en fonction de la nature du sable et de la dose d'argile à plusieurs potentiels matriciels exprimés en pF

Cette dernière gamme de potentiel, doit concerner indirectement la croissance des plantes par son rôle déterminant dans la stabilité du matériau particulièrement en zones arides et semi arides caractérisés par des cycles violents de dessiccation. Dans ce cas, le rôle de la bentonite est extrêmement actif sur la rétention en eau. Il s'ensuit que le sable ne peut exprimer ses propriétés de rétention d'eau qu'à des teneurs en argile relativement basses.

Sur le plan des propriétés d'hydratation, cette étude montre que la bentonite accroît de manière appréciable la rétention en eau du mélange particulièrement dans la gamme de pF comprise entre 2,5 et 4,2 propre à la réserve d'eau utilisable par la plante. Ceci doit assurer une eau disponible d'autant plus indispensable pour la plante, à long terme, que les conditions d'aridité sont sévères.

Nous ne voulons pas revenir sur la dose optimale de bentonite à utiliser dans ce type d'amendement, car plusieurs études ont étudié cette question (El Sherif, 1986 ; Bousnina et Mhiri, 1997 ; Benkhalifa et Daoud, 1998 ; Halila et Tessier, 2006), bien qu'il nous semble convenable de rappeler ici, qu'elle se situe autour de 10 % d'argile. Mais nous devons, par contre, prendre en compte la texture du sable, qui selon qu'il soit fin ou grossier, contribue dans les propriétés d'hydratation du mélange (Fig. 40). A titre d'exemple, une teneur en eau moyenne de 60 % (trait continu) est retenue dans le mélange avec la même énergie de -10 kPa (pF=2) pour une dose de 58 % d'argile pour le sable 1 et 69 % d'argile pour le sable 2. Dans ce cas, à dose d'argile égale, la plante aura beaucoup plus de facilité à s'alimenter en eau avec le sable 2 qu'avec le sable 1. En revanche, une teneur en eau moyenne de 20 % (trait pointillé) est retenue dans le mélange avec la même énergie de -1600 kPa (pF=4,2) pour 53 % d'argile ajoutée au sable 1 contre seulement 41 % d'argile ajoutée au sable 2. Ce qui veut dire, qu'aux forts potentiels matriciels, l'eau est plus fortement retenue dans les mélanges avec le sable 2 par la bentonite. Ce qui joue en faveur d'une stabilité du milieu en cas d'aridité sévère.

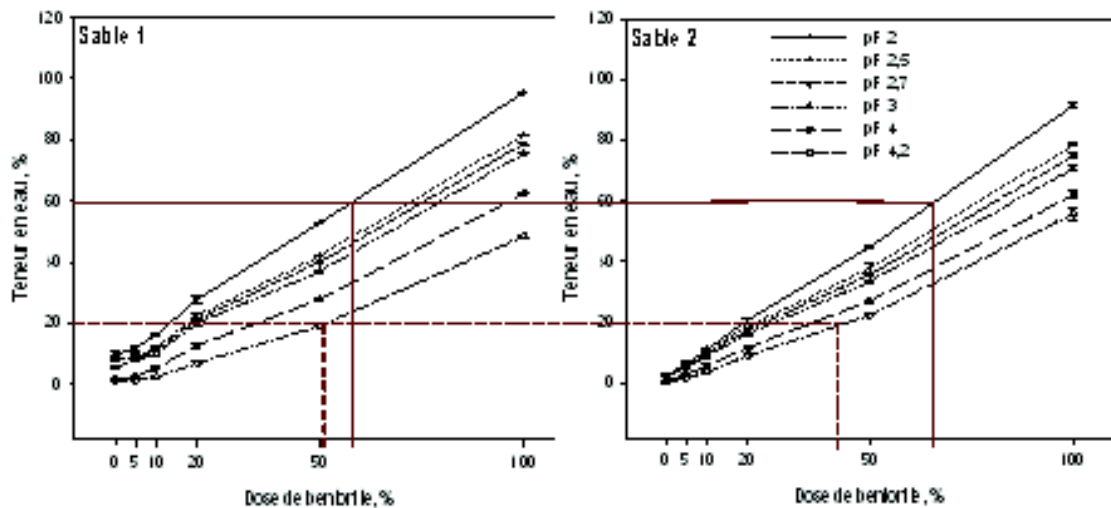


Fig. 39 – Evolution de la teneur en eau des mélanges en fonction du potentiel matriciel (pF) aux diverses doses d'argile pour les deux sables

Parallèlement à l'effet de la texture du sable, il faut aussi considérer la nature de la bentonite elle-même étant donné que nous avons vu dans le chapitre précédent que les conditions de son prélèvement sont déterminantes sur ses propriétés au sein même d'un gisement. S'il s'agit de plusieurs gisements, l'effet de la nature initiale de la bentonite est à prendre en compte sur les propriétés de son mélange avec le sable au même titre que la texture de ce dernier. L'opération d'amendement en argile devrait donc être appréhendée au préalable avec une caractérisation suffisante des deux matériaux afin que le mélange assure une réserve hydrique à long terme à la plante et à des potentiels matriciels dans la limite de faciliter son absorption.

## Conclusion

Pour conclure ce volet, il est important de dire que l'optimisation de l'amendement des sols sableux par la bentonite dans les régions arides et semi arides est relativement soumise aux propriétés initiales du sable lui-même et de la bentonite en fonction des conditions de son prélèvement. La présente étude montre qu'une texture grossière du sable est favorable à la nutrition des plantes. Ceci est obtenu, il est utile de le rappeler, avec la bentonite de Maghnia que nous avons nommé « échantillon 1 », qui présente le plus faible rapport Na/CEC (Chap. II, p. 67). A ce niveau, il faut se demander si ces résultats seront valables si on utilise l'autre bentonite de Maghnia « échantillon 2 » ou encore celle de Mostaganem. Néanmoins, il est connu que pour améliorer la fertilité des sols sableux en agriculture, la bentonite est utilisée sous sa forme naturelle contrairement à son emploi dans l'industrie où elle est traitée. L'on comprend donc, l'importance des propriétés originelles des matériaux sable et bentonite dans le comportement des mélanges.

A ce stade de l'étude, il faut se poser l'autre question du rôle de la nature du sable et de celle de la bentonite vis-à-vis des contraintes abiotiques de salinité et de sodicité. C'est ce que nous allons essayer de vérifier dans le prochain volet de ce chapitre. Pour cela nous allons utiliser le sable 2, le plus grossier et la même bentonite, c'est-à-dire celle qui est naturellement calcique. Autrement dit, nous abordons la question dans son cas le plus favorable étant donné que nous avons à étudier la salinité et la sodicité, deux des plus importantes contraintes abiotiques rencontrées dans les milieux arides et semi arides. De

plus, ce choix nous permettra par la suite de comparer les résultats avec ceux du volet précédent où il était question uniquement de stress hydrique.

## III.2 Etude des propriétés d'hydratation des mélanges en fonction de la dose de bentonite et de la salinité et la sodicité

### Introduction

---

Dans cette seconde partie du chapitre III, il y a lieu de rappeler que l'accent va être mis sur le potentiel osmotique qui se manifeste en présence de sels dans le milieu. En conditions de salinité et de sodicité, il est réellement impossible de dissocier entre ce qui est matriciel de ce qui est osmotique. En effet, les sels augmentent la pression osmotique dans la solution du sol et le milieu est lui-même soumis au phénomène de dessèchement. En réalité, le mélange est donc soumis à l'association des deux types d'énergie (matricielle et osmotique). Cela veut dire que l'évaluation du rôle des différentes composantes de la contrainte exercée sur le matériau est plus problématique. Cependant, pour des raisons de commodité, nous allons appliquer la contrainte liée au potentiel matriciel indépendamment du potentiel osmotique lié aux contraintes de salinité et de sodicité. Cela va nous permettre d'étudier les propriétés d'hydratation des mélanges en fonction de la salinité et de la sodicité à des valeurs du potentiel matriciel variant de  $pF = 2$  à  $pF = 4,2[3]$ . Là en revanche, il nous semble important de faire la différence entre la part d'influence propre à la concentration saline (salinité) et celle liée à la sodicité propre au sodium (SAR). L'importance de cette distinction est afférente à la différence d'effets qu'auraient ces deux paramètres sur les propriétés du sol et de la plante (Mizrahi, 1988). La salinité peut avoir des effets favorables sur le sol et sur la plante et il faut que sa valeur dépasse un certain seuil pour devenir néfaste. *A contrario*, la sodicité a toujours des effets néfastes sur la structure du sol et sur la nutrition des plantes en fonction de sa teneur dans le milieu. C'est pourquoi, nous avons ciblé dans cette partie un seul sable pour le mélange avec la bentonite, ce qui devra nous permettre de se focaliser sur les effets relatifs de la salinité et de la sodicité en fonction de la dose d'argile.

### III.2.1 Matériels et méthodes

---

#### III.2.1.1 Dispositif expérimental

La préparation des mélanges est effectuée dans les mêmes conditions que précédemment. Pour cette étude nous avons choisi le sable 2 et la bentonite de Maghnia «prélèvement 1». Les doses de bentonite sont également les mêmes, c'est-à-dire : 0, 5, 10, 20, 50 et 100 %.

Toutes les mesures sont répétées trois fois conformément au dispositif des blocs complets aléatoires.

#### III.2.1.2 Préparation des solutions salines

Pour contrôler les deux paramètres de salinité et de sodicité, nous avons préparé les solutions salines à partir de deux sels, le chlorure de sodium (NaCl) et le chlorure de calcium (CaCl<sub>2</sub>). Le choix d'associer ces deux sels n'est pas fortuit. D'une part, il permet de faire exprimer les deux caractères favorable et néfaste respectivement attribués aux ions Ca<sup>++</sup> et Na<sup>+</sup> dans le milieu. D'autre part, on ne peut envisager la présence d'un sel unique dans la réalité, à plus forte raison le NaCl, étant donné que les sels se présentent généralement sous différentes espèces, voire même parfois sous forme de combinaisons complexes (Lebron et al., 1994). En fonction des teneurs relatives mises en jeu (Tableau 17), nous avons obtenu les quatre valeurs choisies pour le SAR (0, 5, 15 et 45) et les cinq autres pour la concentration saline (0, 15, 50, 100 et 200 cmol<sup>+</sup>.l<sup>-1</sup>), et ce conformément à la relation du SAR et de la concentration saline:

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{++}] + [Mg^{++}]}{2}}}; [Na^+] + [Ca^{++}] = 20 [C]; 2[Na]^2 + SAR^2.[Na] - SAR^2.[C] = 0$$

SAR = Sodium Absorption Ratio (Taux de Sodium Echangeable)

[Na<sup>+</sup>] = Concentration de Na<sup>+</sup>, Meq.l<sup>-1</sup>

[Ca<sup>++</sup>] = Concentration de Ca<sup>++</sup>, Meq.l<sup>-1</sup>

[Mg<sup>++</sup>] = Concentration de Mg<sup>++</sup>, Meq.l<sup>-1</sup>

[C] = Concentration de la solution saline, cmol<sup>+</sup>.l<sup>-1</sup>

SAR		0				5			
[C], cmol <sup>+</sup> .l <sup>-1</sup>		15	50	100	200	15	50	100	200
NaCl	g.l <sup>-1</sup>	0				3,27	6,24	8,98	12,84
CaCl <sub>2</sub>		16,62	55,40	110,80	221,60	13,56	49,54	102,38	209,55
SAR		15				45			
[C], cmol <sup>+</sup> .l <sup>-1</sup>		15	50	100	200	15	50	100	200
NaCl	g.l <sup>-1</sup>	8,02	16,76	24,89	36,43	14,3	36,62	59,30	92,65
CaCl <sub>2</sub>		9,09	39,68	87,45	187,42	3,21	21,04	55,17	134,68

Tableau 17 – Teneurs en NaCl et CaCl<sub>2</sub> (g) dans la solution saline en fonction de la concentration saline et du SAR

Nous rappelons que la gamme de sodicité (SAR) que nous avons choisie tient compte d'une valeur considérée comme moyenne dans les régions arides et semi arides d'Algérie égale à 15. Dans ce cas, la valeur du SAR 45 est destinée à exprimer des conditions d'aridité extrêmement sévères en zones arides et semi arides d'Algérie (Daoud et Halitim, 1994 ; Hamdi-Aïssa et al., 2004).

Les doses d'argile sont choisies pour couvrir la gamme de teneurs comprises entre les comportements propres à l'argile brute (100 %) et au sable pur (0 %) avec une concentration des valeurs autour de la dose optimale de bonification de 10 %.

### III.2.1.3 Mise en équilibre

Avant de procéder à la mesure de la teneur en eau, les échantillons placés sur la plaque sont mis en contact d'une solution saline de concentration et de SAR donnés pendant 18 heures en vue de leur saturation.

### III.2.1.4 Dispositif expérimental

Nous avons adopté la méthode des blocs aléatoires complets avec trois répétitions. Pour cela, chaque bloc comporte les six doses de bentonite, les quatre SAR (0, 5, 15 et 45) et les cinq concentrations (0, 15, 50, 100 et 200  $\text{cmol}^+ \cdot \text{l}^{-1}$ ).

## III.2.2 Résultats et discussions

### III.2.2.1 Teneur en eau

Les résultats de la teneur en eau des mélanges pour la gamme de potentiel de pression comprise de  $-10$  à  $-1600$  kPa ( $2 \leq \text{pF} \leq 4,2$ ) en fonction de la salinité et de la sodicité sont présentés dans les Figures 41, 43, 45, 47, 49 et 51 pour toutes les doses de bentonite étudiées (0, 5, 10, 20, 50 et 100 %). La courbe en trait continu représente les teneurs en eau témoins obtenues avec une salinité et une sodicité nulles.

Dans une première remarque globale que montrent ces courbes : la salinité a tendance à diminuer la teneur en eau des mélanges et la sodicité, par contre, à l'augmenter. Cependant, il est intéressant d'effectuer une comparaison de l'évolution des teneurs en eau en fonction de la salinité/sodicité avec la courbe témoin pour chacune des doses d'argile.

Si nous considérons l'argile brute (Fig. 41), l'accroissement de la valeur du SAR entraîne une augmentation de la teneur en eau des échantillons étudiés, bien apparente par rapport à la courbe témoin. Parallèlement, les courbes des teneurs en eau restent liées à la salinité des solutions de sorte que, leurs plus grandes valeurs correspondent aux plus faibles concentrations salines. De ce fait, l'évolution de la teneur en eau est donc dépendante des effets relatifs de la salinité et de la sodicité sur les propriétés d'hydratation du mélange. C'est pourquoi, il est intéressant d'effectuer une analyse de la variance à deux critères de classification qui sont la *salinité* et la *sodicité* sur les variations globales de la teneur en eau pour l'argile brute (Dagnelie, 2006). Cette analyse sera faite plus loin pour tous les mélanges avec l'ensemble des doses de bentonite étudiées.

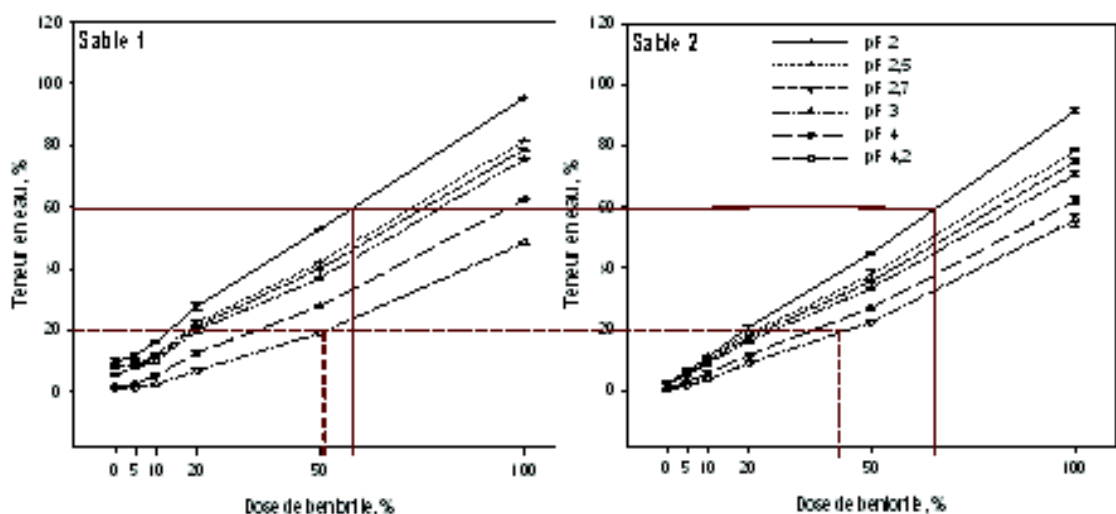




Fig. 40– Evolution de la teneur en eau de l'argile brute en fonction du potentiel matriciel exprimé en pF et de la concentration saline pour différentes valeurs du SAR (0, 5, 15 et 45)

Les résultats de l'analyse de la variance à deux critères de classification[4] (Fig. 42), montrent les parts d'influences relatives de la salinité et de la sodicité sur les variations globales de la teneur en eau de l'argile brute en fonction du potentiel matriciel (pF).

En proportion, la part d'influence liée à l'effet de la salinité, 67 % en moyenne, est plus importante que celle liée à la sodicité égale en moyenne à 23 %. Les variations relatives de ces deux effets en fonction du potentiel matriciel (pF), ne paraissent pas importantes et sont non significatives pour les pF 4 et 4,2 (les résultats pour ces deux derniers pF ne sont pas présentés sur la figure). Cette évolution est propre à l'argile qui, comparée à celles des autres mélanges (Figs. 43, 45, 47, 49 et 51), enregistre les plus grandes valeurs de la teneur en eau par rapport au témoin. Pourtant, la forte part d'influence de la salinité (Fig. 42), devrait plutôt entraîner une réduction de ce paramètre. Ceci n'est vraisemblablement pas le cas. En revanche, la sodicité qui devrait entraîner une augmentation de la teneur en eau, enregistre une part d'influence faible (23 %). Il en ressort, qu'à l'état brut, ce matériau présente l'aptitude d'atténuer les effets de la salinité sur ses propriétés d'hydratation. Nous n'avons pas effectué de test de stabilité structurale (Le Bissonais, 1996) sur ce matériau, mais nous pensons, comme le rapporte la littérature (Sposito et al., 1983 ; El taif et Gharabih, 2007), que la salinité doit jouer un rôle d'agrégation des particules d'argile qui, de toute évidence, influe sur la fonction dispersante de la sodicité.

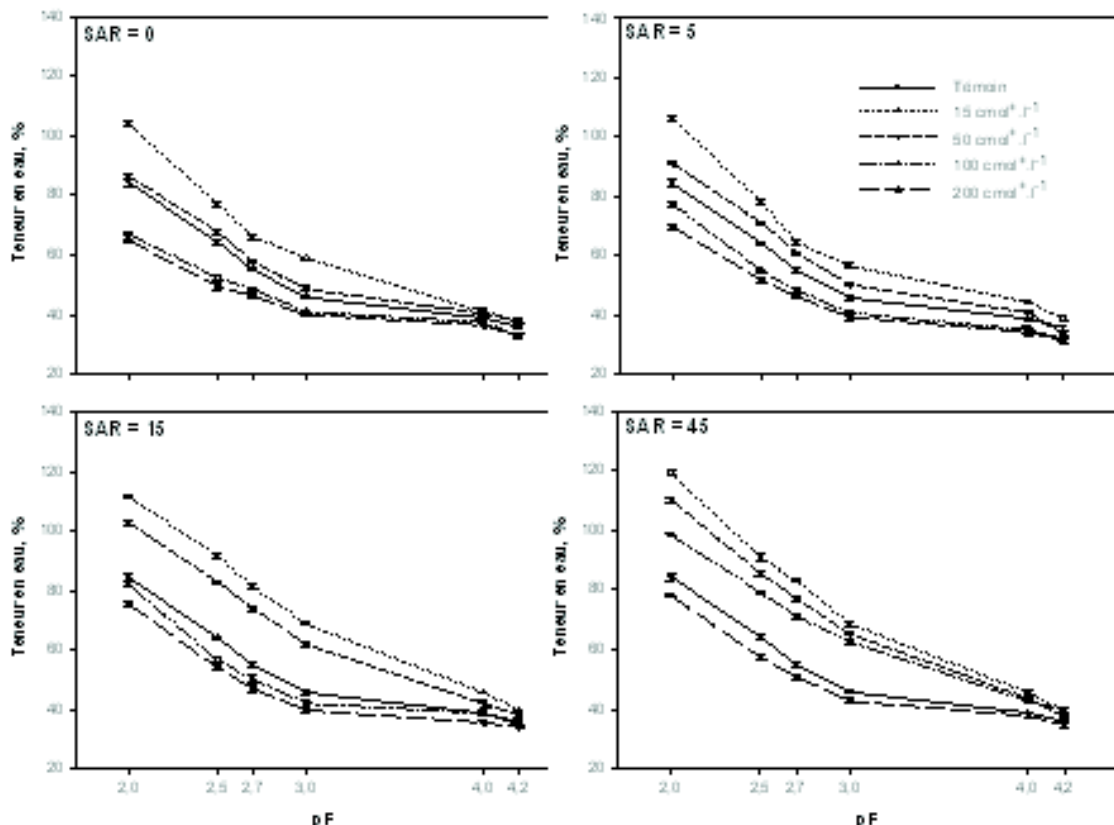


Fig. 41– Parts d'influence relative de la salinité et de la sodicité sur les variations globales de la teneur en eau de l'argile brute en fonction du potentiel matriciel exprimé en pF

Les valeurs de la teneur en eau pour le mélange à 50 % (Fig.43), évoluent globalement, de la même façon que l'argile brute, mais dans des proportions plus faibles, dues probablement à la présence du sable. En effet, même à forte valeur de la sodicité (SAR = 45), les teneurs en eau du mélange obtenues pour la concentration saline de  $200 \text{ cmol}^+ \cdot \text{l}^{-1}$ , demeurent plus faibles que celles liées au traitement témoin. Ceci montre que l'effet relatif de la salinité est, comme le cas précédent, plus important que celui de la sodicité (Fig. 44).

Il est aisé de remarquer (Fig. 44), que pour la gamme de potentiel matriciel (pF) variant de 2 à 3, la part d'influence relative de la salinité sur les variations globales de la

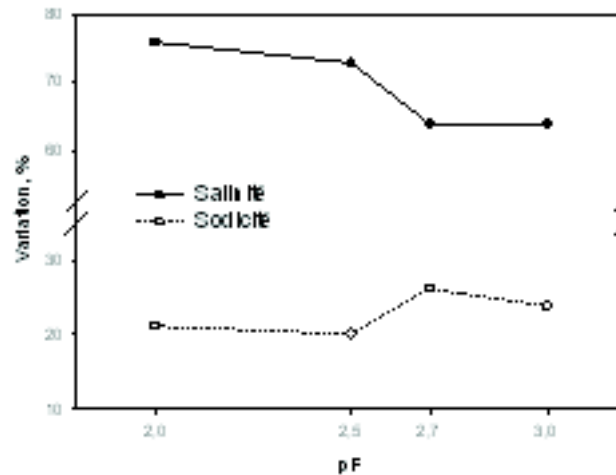


Fig. 42– Evolution de la teneur en eau du mélange à 50 % d'argile en fonction du pF et de la concentration saline pour différentes valeurs du SAR (0, 5, 15 et 45)

teneur en eau, est en moyenne de 29 % contre 16 % pour celle de la sodicité. Par rapport à l'argile brute, ce paramètre a diminué de 57 et 30 % respectivement pour la salinité et la sodicité. Cela est naturellement dû à la présence du sable en quantité équivalente à la

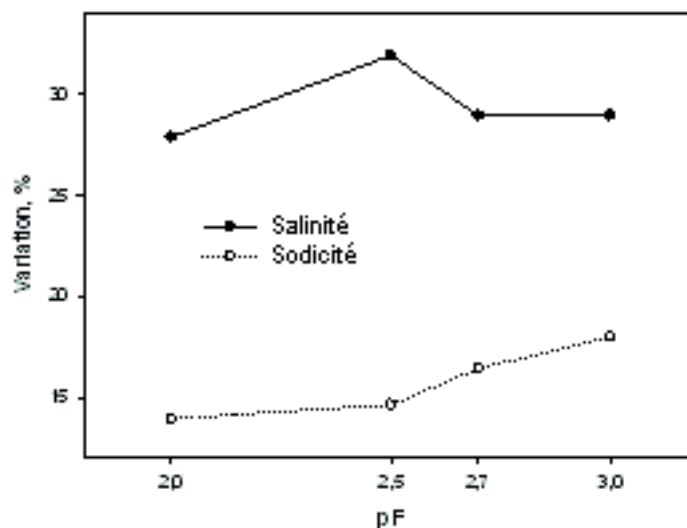


Fig. 43– Parts d'influence relatives de la salinité et de la sodicité sur les variations globales de la teneur en eau du mélange à 50 % d'argile en fonction du pF

bentonite qui, mis à part le fait qu'il affecte la porosité du mélange, n'a pas apporté un changement dans l'allure globale des courbes d'influence relative à la salinité et à la sodicité dans le mélange (Fig. 44). Ceci permet de penser que même à une dose de 50 % de sable, le mélange acquiert toujours le comportement de l'argile. Là, se pose la question de la dose de sable qui permettrait le passage du mélange d'un comportement propre à l'argile à celui propre au sable.

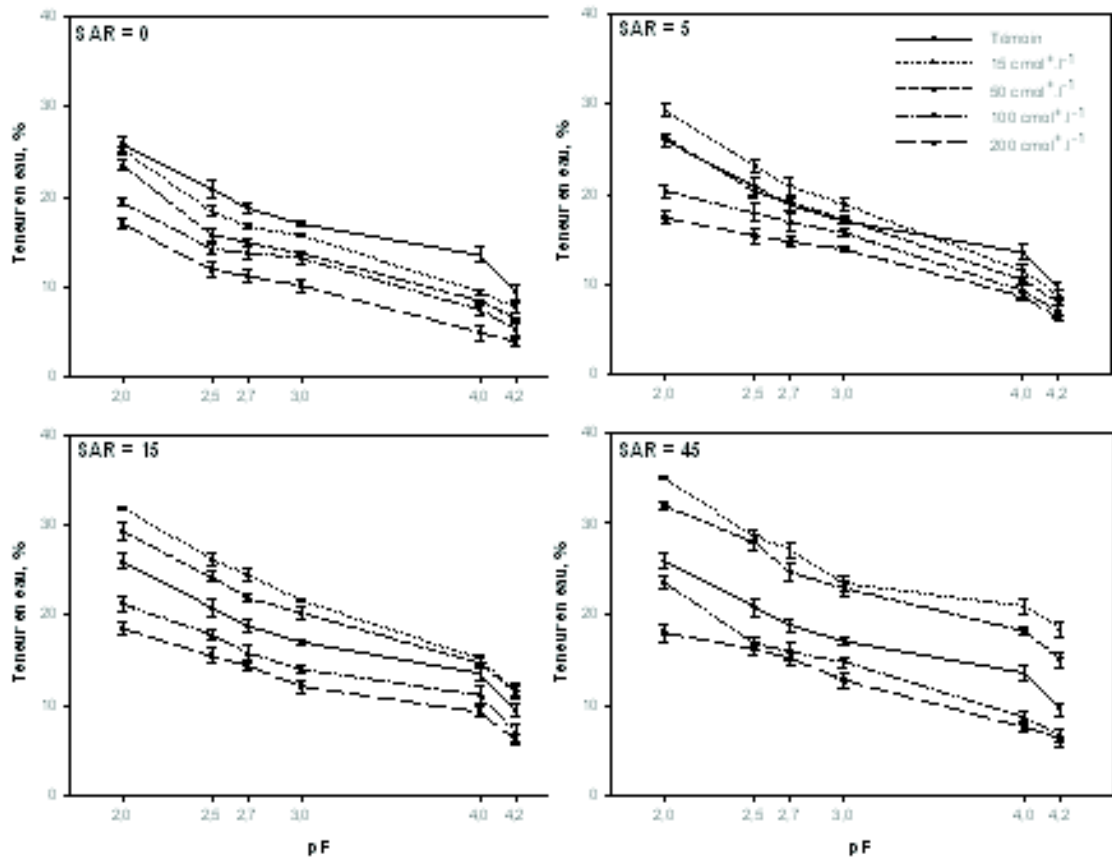


Fig. 44– Evolution de la teneur en eau du mélange à 20 % d'argile en fonction du pF et de la concentration saline pour différentes valeurs du SAR (0, 5, 15 et 45)

Pour le mélange à 20 % de bentonite (Fig. 45), nous retrouvons la même évolution que le mélange précédent mais seulement en proportions plus petites. Dans ce cas, la proportion de 80 % de sable dans le mélange, montre tout comme pour le cas précédent, une évolution des parts d'influence relatives des deux contraintes de salinité et de sodicité similaire mais plus exacerbée (Fig. 46). Cela veut dire que cette teneur en sable favorise les

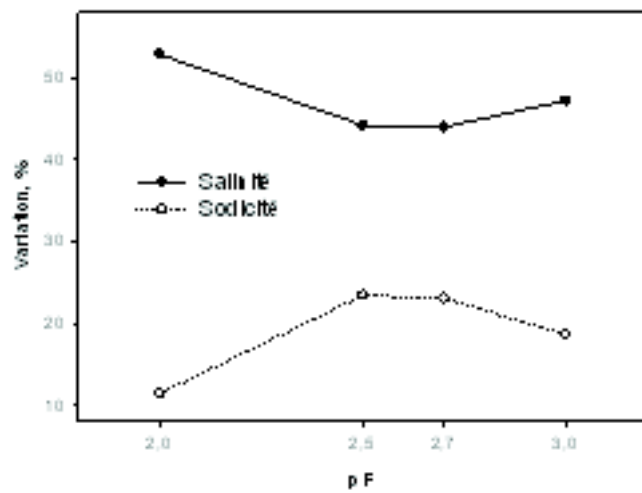


Fig. 45– Parts d’influence relatives de la salinité et de la sodicité sur les variations globales de la teneur en eau du mélange à 20 % d’argile en fonction du pF

effets de ces deux contraintes qui ont augmenté de 60 et 22 % respectivement pour la salinité et la sodicité. Il se trouve donc, que même à teneur en sable égale à 80 %, le mélange garde encore le comportement propre à l’argile.

Pour le mélange à 10 % de bentonite, dose moyenne optimale préconisée dans la littérature pour l’amélioration des propriétés physiques des sols sableux, nous assistons à des teneurs en eau relativement faibles comparés aux valeurs témoins (Fig.47). Ceci exprime,

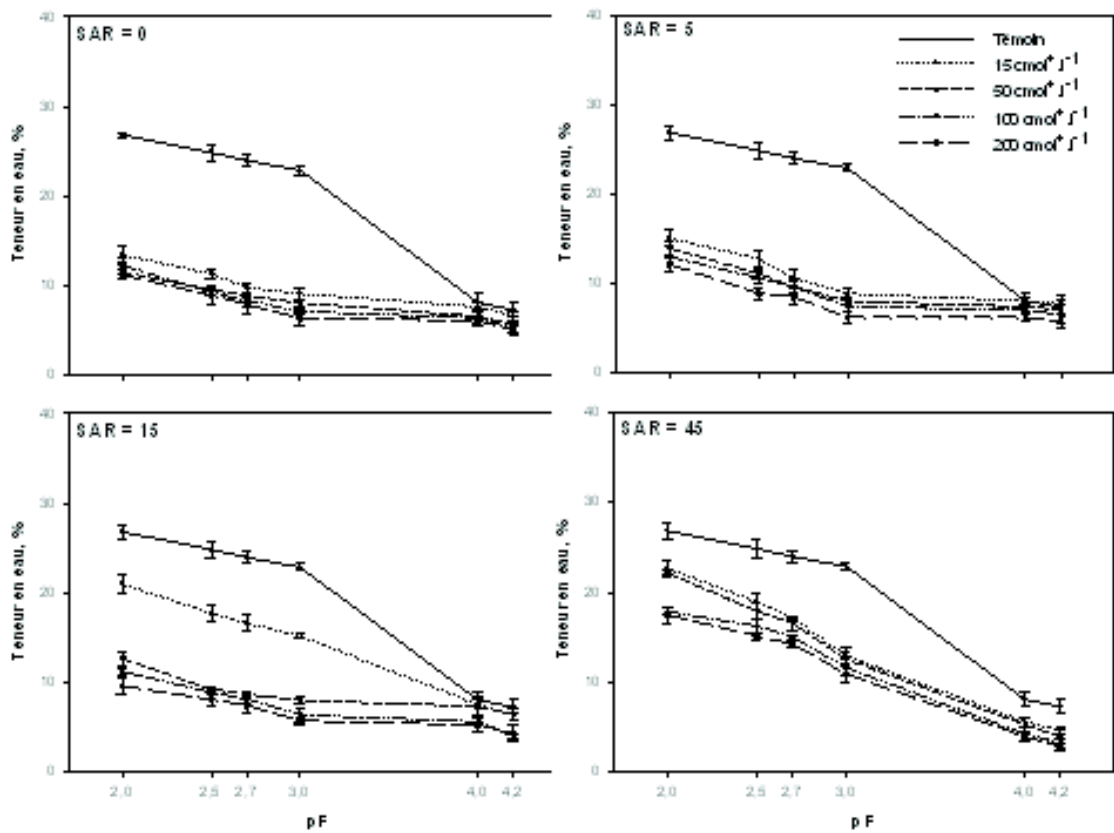


Fig. 46– Evolution de la teneur en eau du mélange à 10 % d'argile en fonction du pF et de la concentration saline pour différentes valeurs du SAR (0, 5, 15 et 45)

*a priori*, une influence importante de la salinité sur les variations globales de la teneur en eau par rapport à la sodicité. En effet, les parts d'influence de ces deux contraintes (Fig. 48), révèlent une augmentation de l'ordre de 69 % de l'effet de la salinité et une diminution de l'ordre de 35% de celui de la sodicité par rapport au cas précédent. Dans ce cas, le mélange exprime une certaine sensibilité à la salinité sur le plan des propriétés d'hydratation. En revanche, il doit présenter un caractère favorable sur le plan de la stabilité structurale vu que l'effet de la sodicité a fortement chuté.

Le mélange à 5 % de bentonite et le sable pur présentent des évolutions de la teneur en eau en fonction de la salinité et de la sodicité très proches de celle obtenue avec le mélange à 10 %, mais dans des proportions encore plus faibles (Figs. 49 et 50).

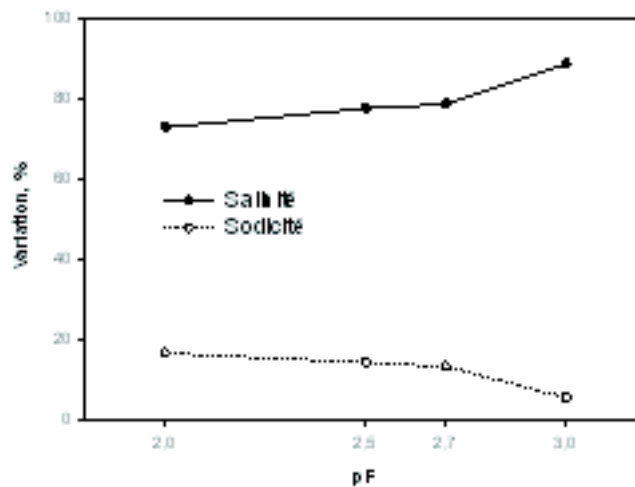


Fig. 47– Parts d'influence relatives de la salinité et de la sodicité sur les variations globales de la teneur en eau du mélange à 10 % d'argile en fonction du pF

Dans ce cas, les substrats semblent prendre un comportement propre au sable caractérisé par une faible teneur en eau due vraisemblablement à l'action combinée de la porosité et de la forte influence liée à la salinité, d'autant plus que l'effet lié à la sodicité est faible.

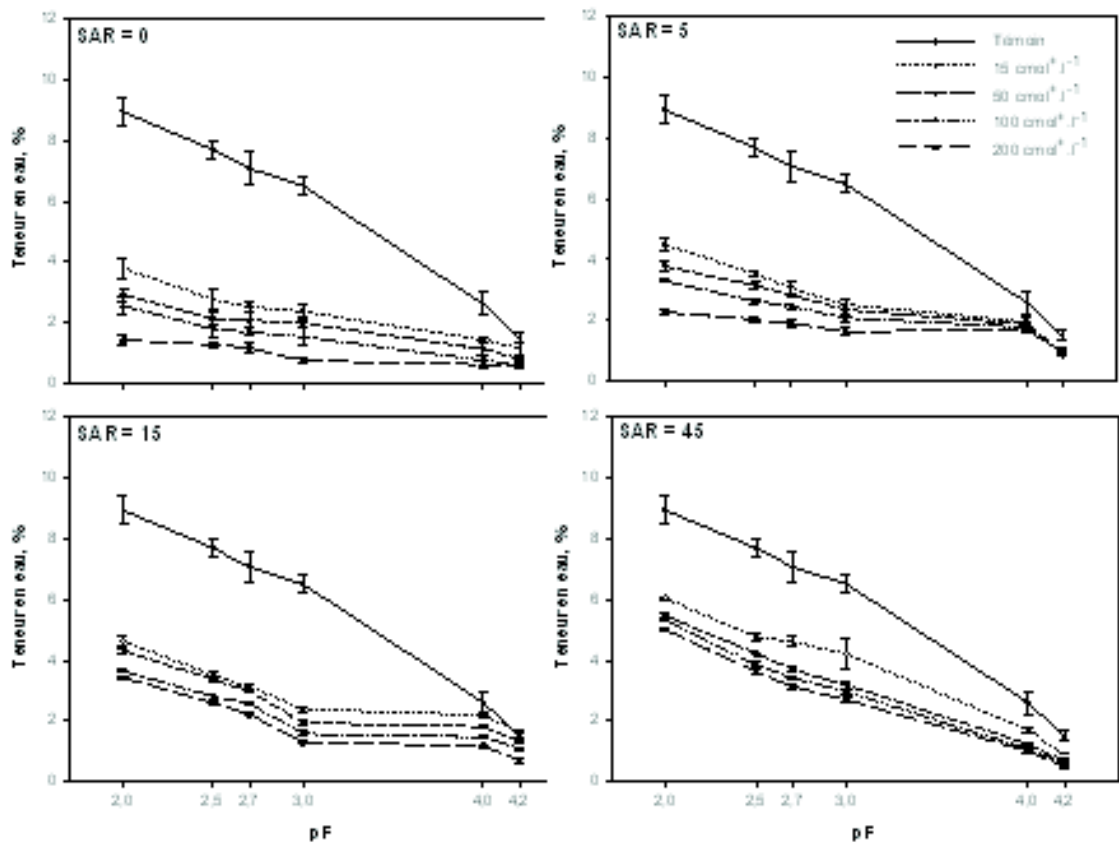


Fig. 48 – Evolution de la teneur en eau du mélange à 5 % d'argile en fonction du pF et de la concentration saline pour différentes valeurs du SAR (0, 5, 15 et 45)

Pour discuter, dans l'ensemble, les résultats de la teneur en eau des mélanges sable-bentonite en fonction de la salinité et de la sodicité, il faut de prime abord, faire la différence entre la *teneur en eau* comme paramètre caractérisant les propriétés d'hydratation et de gonflement des mélanges et les deux contraintes abiotiques de *salinité* et de *sodicité*.

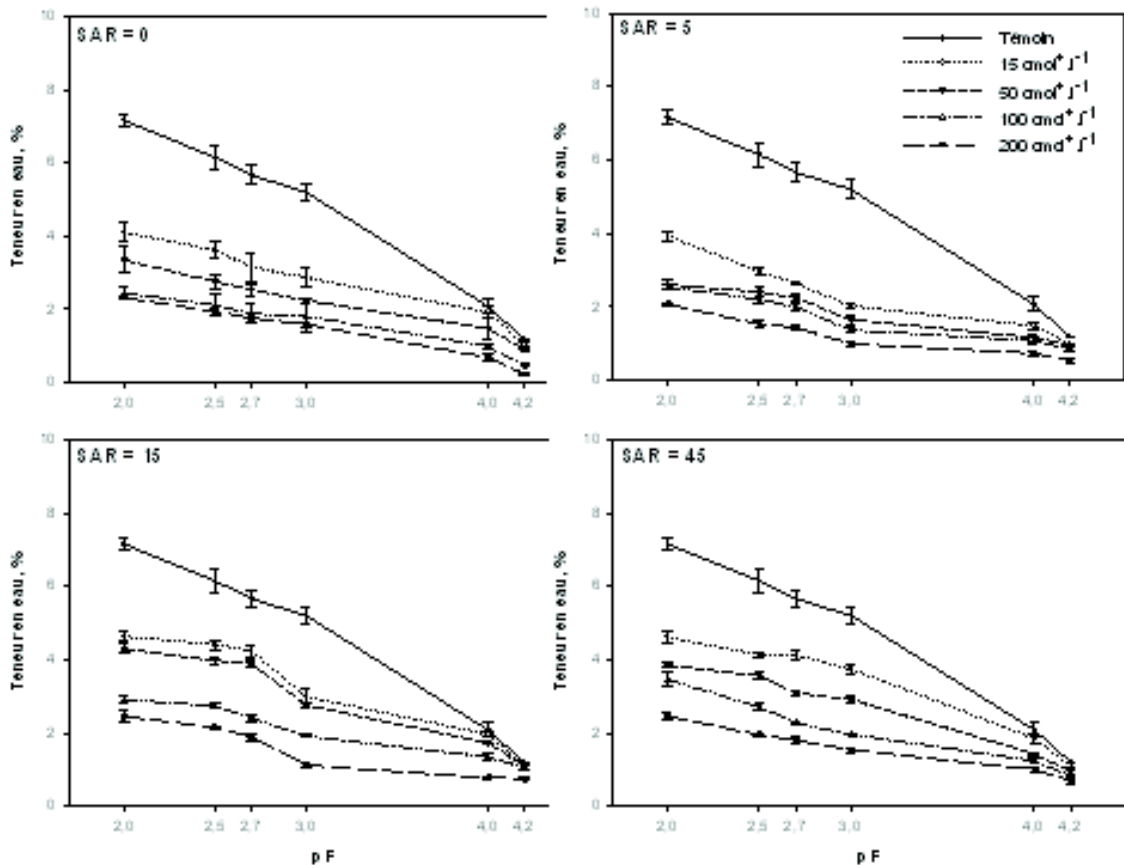


Fig. 49 – Evolution de la teneur en eau du sable pur en fonction du pF et de la concentration saline pour différentes valeurs du SAR (0, 5, 15 et 45)

Nous avons vu que, les parts d'influence relatives de la salinité et de la sodicité, calculées sur la base de l'analyse de la variance à deux critères de classification, varient en fonction de la dose de bentonite ajoutée au sable. Ces résultats, résumés dans la figure 51, montrent que la part d'influence de la salinité est maximale pour le sable pur et est diminuée au fur et à mesure que la dose d'argile augmente jusqu'à la valeur de 50 % à partir de laquelle le rôle de la salinité devient prépondérant à 100% d'argile.

En revanche, la part d'influence de la sodicité augmente en allant du sable pur à la dose de 20 % de bentonite, marque ensuite un palier jusqu'à la dose de 100 % d'argile. Nous rappelons que, la salinité a tendance à diminuer la teneur en eau par le fait qu'elle modifie l'espace poral dans lequel se localise l'eau, par contre la sodicité entraîne une augmentation de ce paramètre du essentiellement au phénomène de défloculation de la phase argileuse (Chaudhari, 2001 ; Dikinya et al., 2006).

Dans ces conditions, nous déduisons que la diminution de la teneur en eau moyenne [5] (Fig. 51), est naturellement due à la diminution de la dose de bentonite mais aussi à l'effet combiné de la salinité et de la sodicité. Le fait, que les parts d'influence de la salinité soient maximales pour le sable pur et l'argile brute, montre une similitude dans les comportements sableux et argileux vis-à-vis de la salinité. Ceci n'est pas le cas pour la part d'influence de la sodicité, qui présente un maximum pour la dose de 20 % d'argile correspondant à une forte diminution de celle de la salinité. Ceci montre, que face à ces deux contraintes de salinité et de sodicité, le mélange peut prendre un comportement totalement différent d'un autre du seul fait de la différence de teneur en bentonite ajoutée au sable. C'est le cas, par exemple,

des mélanges dont la teneur en bentonite est < 20 % d'une part et ceux dont la teneur est > 50 %, d'autre part. Quand la dose d'argile augmente, le premier lot de mélanges, enregistre une diminution de la part d'influence de la salinité accompagnée d'une augmentation de celle de la sodicité. Le second lot, par contre, montre un accroissement de la part d'influence de la salinité accompagné d'une variation insignifiante de celle de la sodicité.

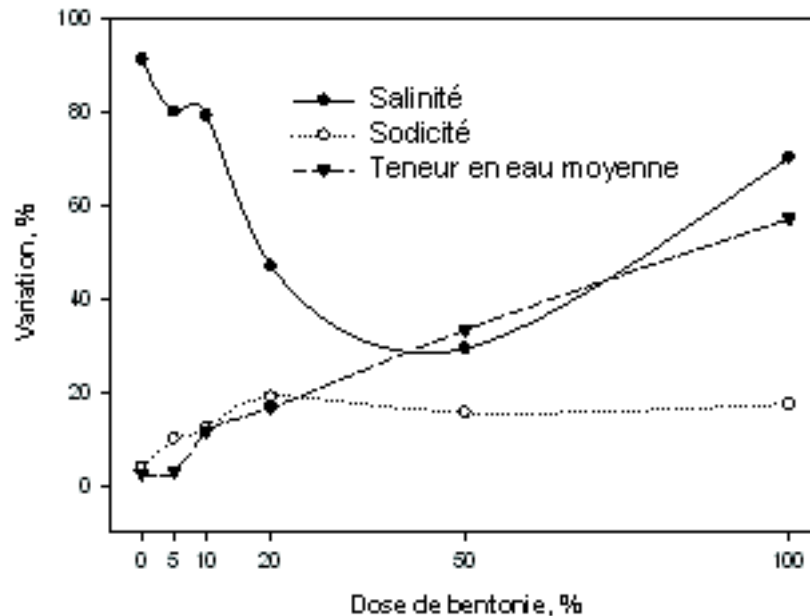


Fig. 50– Parts d'influence relatives de la salinité et de la sodicité sur les variations globales de la teneur en eau des mélanges en fonction de la dose de bentonite

La teneur en eau moyenne chute spectaculairement à la dose de 5 % d'argile par rapport à celle de 10 %. Pourtant, les parts d'influence de la salinité et de la sodicité sont pratiquement inchangées pour ces deux doses d'argile. C'est donc l'effet de la faiblesse de la dose de 5 % de bentonite qui a probablement entraîné cette importante chute de la teneur en eau moyenne. Ceci explique en partie, l'importance de la dose de 10 % d'argile considérée comme la dose optimale dans le cadre de l'amélioration des propriétés des sols sableux. Cette dose, marquerait vraisemblablement le début du seuil de passage du mélange du comportement propre au sable à celui où l'argile impose ses propriétés, quoique que la teneur en eau soit un paramètre nécessaire mais pas suffisant à l'explication d'un tel comportement du mélange. Autrement dit, la teneur en eau moyenne est plus importante pour les doses d'argile > 10 %, cependant, elle serait dans ce cas, tellement retenue par le mélange sous l'effet du potentiel matriciel que les plantes n'en disposeraient que médiocrement. A ce stade de la discussion, il est important d'aborder les effets de la salinité et de la sodicité susceptibles d'affecter les propriétés physiques du mélange pour cette dose optimale et en conséquence la nutrition des plantes. D'autant plus que nous savons que c'est paradoxalement, dans les zones soumises intensément à ces deux contraintes abiotiques, que se développent des sols typiquement sableux. C'est-à-dire des sols qui nécessitent un aménagement pour améliorer leur capacité de rétention en eau et pour lesquels nous préconisons un amendement argileux. Si cette étude nous a permis de comprendre, dans une large mesure, comment évoluent les effets relatifs de la salinité et de la sodicité sur la teneur en eau des mélanges en fonction du potentiel matriciel et de la dose de bentonite incorporée au sable, il n'en demeure pas moins, que nous devons faire appel à d'autres paramètres d'étude en mesure d'évaluer autrement les modifications liées



aux contraintes abiotiques de salinité et de sodicité et susceptibles d'affecter les propriétés du mélange et celles de la plante notamment pour la dose d'argile optimale.

Il est connu qu'en ce qui concerne les propriétés du mélange sur le plan structural, c'est l'effet spécifique de la *sodicité* qui est susceptible d'entraîner leur dégradation. Il se trouve que le paramètre le plus pertinent pour l'évaluation des effets de la sodicité est la *conductivité hydraulique saturée*. C'est pourquoi, on assiste ces dernières années, à des explications des manifestations liées aux phénomènes d'humectation dessiccation et de gonflement-retrait de matériaux soumis à la salinité/sodicité, focalisées sur l'interprétation de leurs conductivités hydrauliques saturées (Pupisky et Shainberg, 1979 ; Chaudhari, 2001 ; Keren et Ben-Hur, 2003 ; Dikinya et *al.*, 2006). Cela nous amène à consacrer le prochain chapitre, à l'étude de la conductivité hydraulique saturée de nos mélanges sable-bentonite en fonction de la salinité et de la sodicité. Dans ce cas, nous allons prendre en compte la texture du sable et son influence sur les propriétés du mélange.

Pour la plante, la donnée est évidemment différente pour au moins deux raisons. La première concerne le fait que la nature du matériel d'étude est *végétale* et la seconde est liée au fait que le matériau que nous étudions fait lui-même l'objet de support à ce matériel

végétal. Dans ce cadre, la culture soumise aux contraintes de salinité/sodicité que nous allons étudier plus loin dans un autre chapitre, va jouer le rôle d'indicateur biologique d'éventuels

effets de ces deux contraintes abiotiques sur les propriétés du mélange. Cette approche sera focalisée sur l'évolution des caractéristiques morphologiques et racinaires d'une culture de tomate choisie pour sa tolérance moyenne à la salinité.

Avant de clore ce chapitre, il nous semble opportun d'examiner l'évolution de la réserve utile (RU) des mélanges sable bentonite soumis aux deux contraintes de salinité et de sodicité.

### III.2.2.2 Réserve utile (RU)

A partir des teneurs en eau aux potentiels matriciels à  $-10$  (pF=2) et  $-1600$  kPa (pF=4,2), il est possible de déterminer la réserve utile d'un matériau par différence de ces deux quantités. La figure 52 représente les valeurs de la RU en fonction de la salinité et de la sodicité pour le sable pur, la dose de 10 % et pour l'argile brute. C'est pourquoi, nous présentons dans ce qui suit les résultats des comportements propre au sable, à l'argile et enfin à celui du mélange à 10 %.

Pour le sable pur, l'accroissement de la concentration saline entraîne une diminution de la RU pour les faibles valeurs du SAR (0 et 5). L'effet de la salinité se manifeste légèrement pour le SAR 15 et se confirme pour le SAR 45.

Pour le mélange à 10 % d'argile, l'évolution de la RU est similaire au cas précédent sauf que pour les faibles valeurs du SAR (0 et 5), la diminution de la RU suite à l'accroissement de la concentration saline est très faible.

Pour l'argile brute, les courbes de la RU montrent un effet de la sodicité décelable grâce une comparaison avec la courbe témoin (salinité et sodicité nulles). Elles montrent aussi une diminution de la RU suite à l'augmentation de la solution saline. En somme, l'effet de la salinité semble dominer sur celui de la sodicité étant donné que même au SAR = 45, la RU, en plus du fait qu'elle enregistre des valeurs qui relativement sont proches de celles liées au SAR = 15, diminue suite à l'accroissement de la concentration saline.

Le paramètre de la RU ne rend pas compte de la réserve réellement utilisable par la plante étant donné que la part de la réserve d'eau facilement utilisable (RFU) est elle-même dépendante du potentiel matriciel qui à son tour dépend de la teneur en argile dans le mélange.

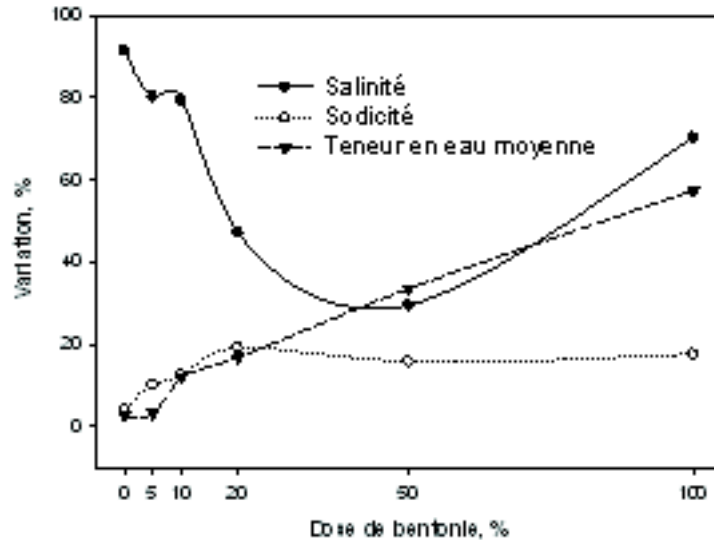


Fig. 51– Réserve utile en fonction de la salinité et de la sodicité pour les doses de 0, 10 et 100 % de bentonite

En effet, bien que les fortes proportions d'argiles soient de nature à assurer une grande RU, il n'en demeure pas moins que leur frange facilement utilisable par la plante est limitée. C'est pourquoi, il est important de prendre avec beaucoup de précautions l'analyse de la réserve hydrique notamment en présence de contraintes de salinité et de sodicité. Comme exemple, nous citerons le cas d'une éventuelle hyperhydratation du matériau qui avantagerait un comportement sodique susceptible d'affecter la stabilité du mélange (Halilat, 1998 ; Chaudhari, 2001).

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu voir l'importance de la bentonite de Maghnia sur les propriétés d'hydratation des mélanges sables-argiles. Ceci a été obtenu dans la meilleure combinaison de nos échantillons étudiés, c'est-à-dire le sable 2 (le plus grossier) et la bentonite de Maghnia 1. Elle a aussi mis en évidence le rôle non négligeable de la granulométrie du sable. En effet, la texture grossière du sable est favorable à une plus facile absorption de l'eau par les plantes qu'une texture fine à dose d'argile égale. Cet aspect est important, il importe de le vérifier à travers l'étude de la conductivité hydraulique saturée.

Cette étude nous a permis également de déduire que les effets relatifs de la salinité et de la sodicité sur les propriétés du mélange sont liés à la dose de bentonite elle-même. Pour les doses d'argile < 20 %, l'effet de la salinité sur la teneur du mélange diminue à l'inverse de celui de la sodicité qui augmente. Pour les doses de bentonite > 50 %, l'effet de la salinité sur les propriétés d'hydrations du mélange augmente et celui de la sodicité enregistre des

variations insignifiantes. Ceci est liée vraisemblablement aux comportements propres aux deux matériaux respectivement le sable et la bentonite.

Par ailleurs, les données de la RU montrent que l'effet de la sodicité s'exprime aux faibles concentrations salines. Dans ce cas, autant la concentration de  $15 \text{ cmol}^+ \cdot \text{l}^{-1}$  paraît assez faible pour atténuer les effets de la sodicité, autant celle de  $100 \text{ cmol}^+ \cdot \text{l}^{-1}$  semble marquer le seuil d'une forte diminution de l'effet sodique mêmes pour les fortes valeurs du SAR.

Dans la gamme des doses d'argile  $< 20 \%$ , nous avons déduit que la dose de  $10 \%$  marquerait probablement le début du seuil de passage du mélange du comportement propre au sable à celui de l'argile.

# Chapitre IV Effets de la salinité et de la sodicité sur la conductivité hydraulique saturée de mélanges de sable et d'argile

## Introduction

Ce chapitre a pour but de faire le point sur les propriétés des mélanges sables-argiles à travers un paramètre très pertinent pour l'évaluation des effets liés aux contraintes abiotiques de salinité et de sodicité : la conductivité hydraulique saturée (CHs). En effet, il est admis de nos jours que la CHs indique, assez clairement, la dégradation des propriétés physiques d'un matériau liée, en général, à la salinité et spécifiquement à la sodicité (McIntyre et Loveday, 1979 ; Chaudhari, 2001; Dikinya et al., 2006). C'est aussi le paramètre qui est très souvent utilisé pour le diagnostic des terres soumises au phénomène de salinisation. Dans ce cas, l'utilisation de modèles mathématiques apporte un intérêt certain pour la couverture de grandes superficies affectées par la salinité/sodicité en temps et en moyens (Ahuja et Williams, 1991 ; Ahuja et al., 1999 ; Jarvis et al., 2002). Dans cette étude, nous recourons à ce paramètre pour établir une comparaison entre les mélanges en fonction de la salinité et la sodicité et pour les deux types de sable fin et grossier.

## IV.1 Matériels et méthodes

### IV.1.1 Dispositif expérimental

---

On crée une gamme de matériaux à partir de nos deux sables 1 et 2, auxquels on ajoute différentes proportions de bentonite. Avec le sable 1, on réalise une série de mélanges de 0, 5, 10 et 15% de bentonite ; avec le sable 2, une autre série de 0, 5, 10, 20, 50 et 100% de bentonite. On irrigue ces matériaux avec une gamme de solutions percolantes de salinité et de sodicité (SAR) variables pour mesurer la CHs. Pour la série 1, les valeurs du SAR sont de 0, 10, 20 et 30, pour la série 2, elles sont de 0, 15, 30 et 45. Les valeurs de la salinité des solutions percolantes sont pour les deux séries de 10, 100 et 1000  $\text{cmol}^+ \cdot \text{l}^{-1}$ . L'eau distillée avec une salinité et une sodicité nulles est prise comme solution témoin. Toutes les mesures de la CHs sont répétées trois fois conformément au dispositif des blocs complets aléatoires. Pour les deux séries de mesure de la CHs, on retrouve dans chaque bloc, les doses de bentonite, les concentrations salines et les SAR correspondants. Nous avons effectué une analyse de la variance à deux critères de classification pour étudier les effets relatifs de la salinité et de la sodicité sur la CHs (Dagnelie, 2006).

Dans la première série de mesure il est recherché la réponse des substrats à une gamme de sodicité moyenne telle qu'elle se manifeste en régions arides et semi arides d'Algérie (Daoud et Halitim, 1994). En vue de permettre une étude exhaustive de l'effet de

la salinité, il est nécessaire de recourir à des seuils de concentrations salines importants : 10, 100 et 1000  $\text{cmol}^+ \cdot \text{l}^{-1}$  (Halilat et Tessier, 2000).

Dans la seconde série de mesures, la gamme de sodicité est plus importante (SAR 45), ce qui permet d'exprimer des conditions extrêmement sévères d'aridité des régions arides et semi arides d'Algérie (Daoud et Halitim, 1994 ; Oster et Shainberg, 1991 ; Levy et *al.*, 2005). Dans ce dernier cas, les teneurs élevées en argiles permettent de définir le comportement propre à l'argile.

### IV.1.2 Matériaux : sable et argile

---

Les échantillons des deux sables ont subi le même protocole de préparation que les chapitres précédents.

La bentonite de Maghnia utilisée correspond à l'échantillon 1.

Après séchage à l'étuve à 105°C pendant 24 heures, les mélanges ont été effectués pour les deux séries manuellement à sec puis transvasés dans les colonnes du dispositif de mesure de la CHs selon le protocole rapporté par Kheyrahi et Monnier (1968) et Fiès (1971), qui consiste à introduire le mélange sable-argile par couches minces successives de manière à assurer l'homogénéité de l'ensemble.

### IV.1.3 Obtention de la solution saline

---

La solution saline est, comme pour le chapitre précédent, composée de deux sels, le chlorure de sodium (NaCl) et le chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ). Le tableau 18, montre les teneurs relatives en ces deux sels pour l'obtention des gammes de valeurs des SAR et des concentrations salines utilisées pour les mesures.

### IV.1.4 Dispositif de mesure de la conductivité hydraulique

---

Le dispositif de mesure de la CHs est celui décrit par Aubert (1978), il se compose de quatre colonnes graduées connectées à un tube horizontal et relié par l'intermédiaire d'un robinet à un flacon de Woolff. Ce dernier est alimenté à partir d'un autre flacon de Woolff à l'aide d'un robinet (Photo 5). Le ballon de Woolff supérieur permet d'alimenter celui situé à

un niveau plus bas dont le rôle est d'assurer une charge constante sur les colonnes d'échantillons. Ce dernier alimente les colonnes par le tube horizontal. Suite à l'établissement de l'équilibre entre la solution et l'échantillon, les volumes des solutions recueillies sont mesurés au bout d'une heure de percolation.

Concentration cmol l <sup>-1</sup>	SAR	NaCl g.l <sup>-1</sup>	CaCl <sub>2</sub> g.l <sup>-1</sup>	SAR	NaCl g.l <sup>-1</sup>	CaCl <sub>2</sub> g.l <sup>-1</sup>
10	0	0	11.08	10	4.61	6.75
100		0	110.80		17.26	94.61
1000		0	1108		57.60	1053.97
10	15	6.14	5.32	20	7.30	4.23
100		24.89	87.45		31.91	80.87
1000		85.32	1027.98		112.35	1002.60
10	30	8.86	2.77	45	10.10	1.60
100		44.29	69.25		59.3	55.17
1000		164.38	953.80		237.53	885.17

Tableau 18 – Composition chimique de la solution de NaCl + CaCl<sub>2</sub>, g.l<sup>-1</sup>



Photo 5 - Dispositif de mesure de la conductivité hydraulique saturée

$$CH_s = C \cdot V / H \cdot S$$

avec C : hauteur de la colonne d'échantillon, cm.

- H : hauteur de la charge d'eau, cm.
- V : volume d'eau recueilli pendant une heure, ml.
- S : section intérieure de la colonne, cm<sup>2</sup>.

Avant de procéder à la mesure de la CH<sub>s</sub>, nous avons fait percoler la solution saline à travers l'échantillon jusqu'à ce que la conductivité électrique (CE) de la solution de drainage recueillie atteigne celle de la solution saline. Le temps d'équilibrage varie en fonction de la dose d'argile et des teneurs relatives de salinité et de sodicité mise en jeu.

La CE est mesurée à l'aide d'un conductimètre sur extrait de pâte saturée (Allison et al, 1954 ; Rhoades et al., 1989).

## IV.2 Résultats et discussions

### IV.2.1 Première série : sable 1

La conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (CE) des substrats augmente, sous l'effet de l'accroissement de la concentration saline et du SAR (Fig.53). Ce paramètre augmente légèrement avec l'accroissement de la dose d'argile et devient important pour la concentration de 1000 par rapport à 10 et 100  $\text{cmol}^+.\text{l}^{-1}$ .

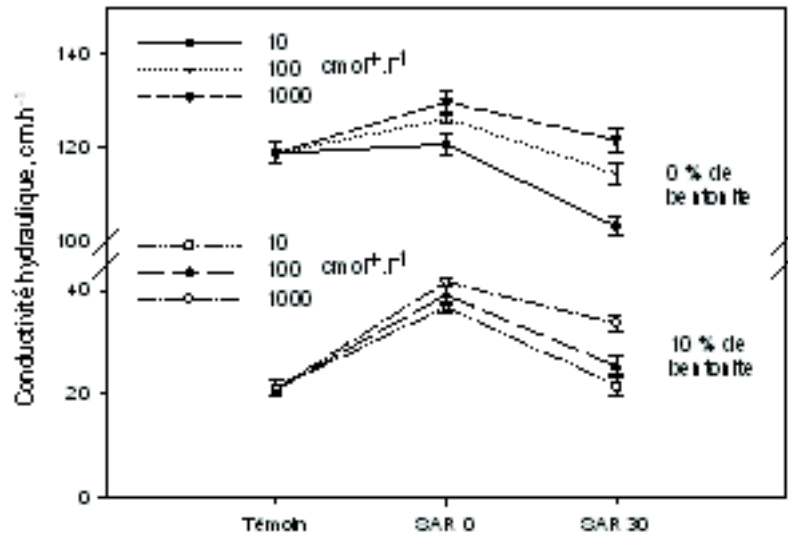


Fig. 52- Effets de la salinité ( $\text{cmol}^+.\text{l}^{-1}$ ) sur la CE en fonction de la teneur en bentonite et de la sodicité (SAR, 0 à 30) du mélange argile-sable 1

La CHs diminue suite à l'augmentation de la dose de bentonite et du SAR (Fig.54). A priori, les variations de la CHs dues à l'accroissement de la concentration saline semblent relativement faibles comparés à celles liées à la dose d'argile et au SAR. Mais, l'effet de la concentration saline par rapport au témoin devient apparent particulièrement pour la dose de 10 %. L'écart des valeurs de la CHs entre les SAR 0 et 30 est d'autant plus élevé que la concentration saline est plus faible.

Une forte corrélation existe entre la CE et la salinité (Fig.53), elle peut conduire à une liaison aisément mesurable des variations entre la CE et la CHs, sous la réserve que l'effet de la sodicité ne soit important (Sally et David, 2004). Ceci est lié à l'effet de la salinité qui contribue à l'augmentation de la CHs contrairement à celui de la sodicité qui en entraîne la diminution. En effet, si nous reconsidérons la valeur du SAR = 0 (Fig.54), la CHs prend des valeurs plus élevées que celles liées au traitement témoin (concentration nulle) notamment pour la dose de 10%.

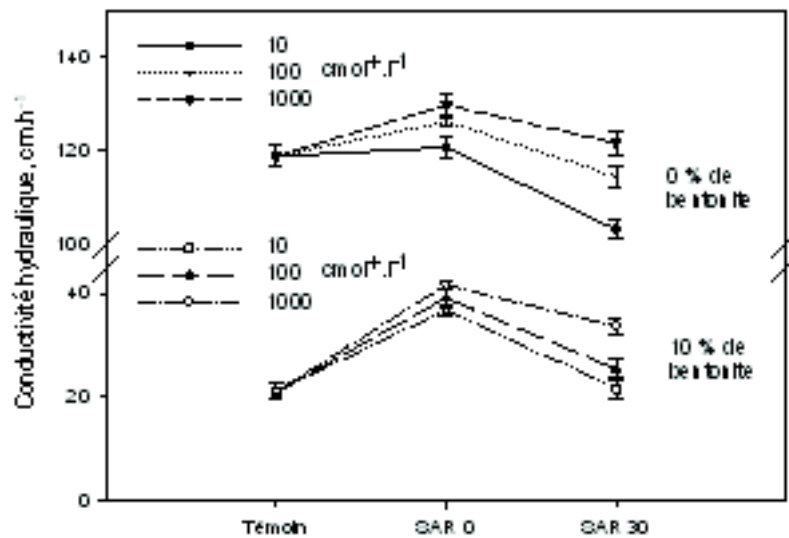


Fig. 53- Conductivité hydraulique ( $cm.h^{-1}$ ) en fonction de la salinité de la solution ( $cmol^{+}.l^{-1}$ ) et de la sodicité (SAR, 0 et 30) pour le mélange argile-sable 1

## IV.2.2 Deuxième série : sable 2

Les résultats de la CHs des mélanges (Fig.55)[6], montrent qu'elle est en premier lieu fonction de la teneur d'argile. Elle passe de 200 à 0,1  $cm.h^{-1}$  du sable à l'argile pure ce qui est cohérent avec les données de la littérature. Ce paramètre varie aussi en fonction de la concentration saline. Globalement, plus la concentration saline est élevée, plus la CHs est elle-même élevée dans le domaine des faibles SAR, c'est à dire de 0 à 15. On peut noter qu'il existe une variation de la conductivité hydraulique significative, même pour le sable pur, entre 10 et 100 d'une part, et 1000  $cmol^{+}.l^{-1}$  d'autre part.

L'influence du SAR permet de décroître spectaculairement la conductivité hydraulique saturée aux faibles concentrations salines et pour les fortes teneurs en argile. Dans ce cas de figure, la CHs peut atteindre des valeurs extrêmement faibles (0,1  $cm.h^{-1}$ ).

## IV.2.3 Discussions

Il ressort de ce chapitre, un certain nombre de questions qui méritent d'être discutées notamment celle qui concerne l'importance de la texture des sables dans l'ajout d'argile à un sol, le rôle de l'argile elle-même en fonction de sa nature et de celle des constituants associés et enfin les rôles respectifs de la salinité et de la sodicité dans des mélanges argile sable.



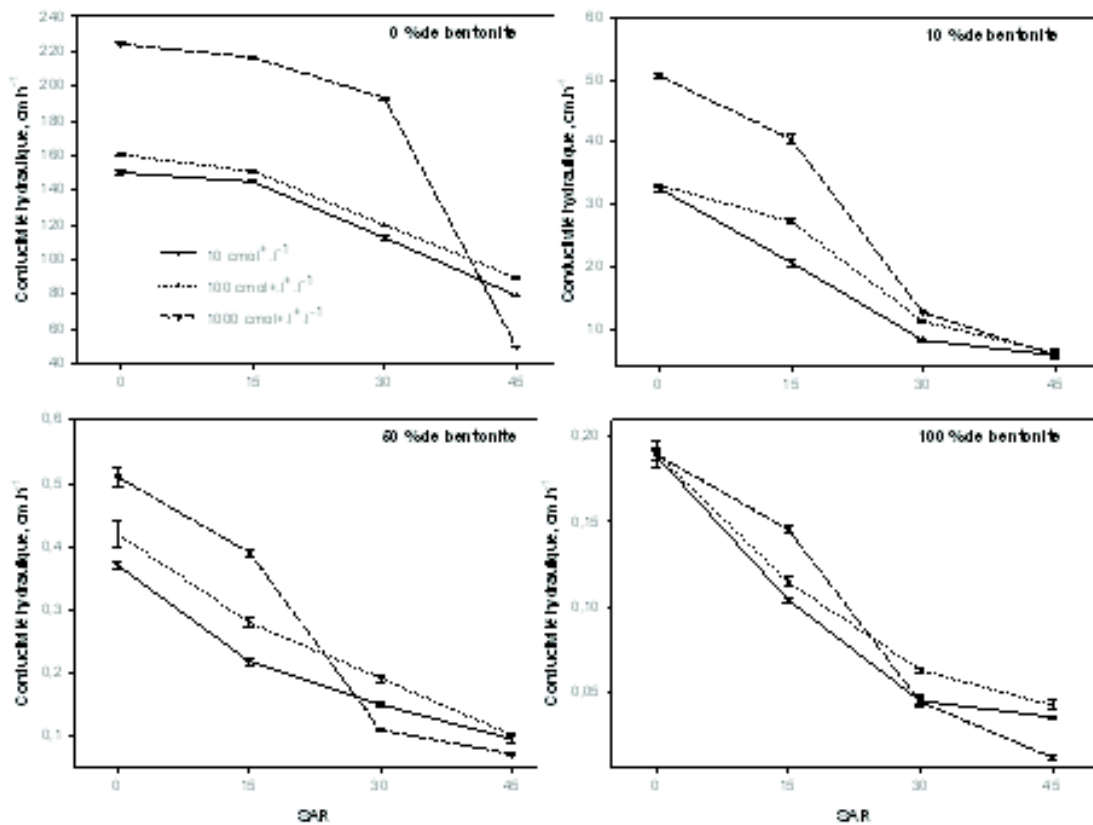


Fig. 54- Effets de la salinité ( $\text{cmol}^+ \cdot \text{l}^{-1}$ ) sur la conductivité hydraulique en fonction de la dose d'argile et de la sodicité (SAR, 0 à 45) du mélange argile-sable 2

#### IV.2.3.1 Effet de la texture des sables sur le comportement des mélanges

Dans ce chapitre nous avons étudié des mélanges sable-argile en considérant les deux sables 1 et 2 dont la granulométrie est différente. Il n'est pas surprenant de voir que la conductivité hydraulique saturée (Figs. 54 ; 55) soit supérieure, à teneur en argile identique, pour le sable 2, le plus grossier ( $D_{70}=0,40$  mm) par rapport au sable1, plus fin ( $D_{70}=0,28$  mm). Par ailleurs, nous avons vu précédemment que la teneur en argile est le principal paramètre qui contrôle la conductivité hydraulique (Fig.55). Cependant il est intéressant d'analyser pour les deux sables, l'effet de la sodicité et la salinité dans les variations de la CHs. Pour cela nous avons reporté les résultats de l'analyse de la variance de ces deux critères de classification, la salinité et la sodicité, dans la figure 56. Cette figure indique que la part d'influence de la sodicité sur les variations globales de la CHs ne sont pas les mêmes dans les deux mélanges sable-argile. Pour le sable le plus fin (sable 1) on observe une augmentation de l'effet de la sodicité sur la conductivité hydraulique pour la dose de 5% par rapport au témoin, puis une diminution pour 10% et enfin une chute pour 15%. En revanche la part d'effet spécifique de la salinité sur la CHs augmente continûment suite à l'accroissement de la dose d'argile. D'après ce que nous connaissons du rôle des sels et du sodium échangeable, cela signifie que la salinité contrôle, via la limitation du gonflement de l'argile en milieu salin, une bonne partie de la porosité intergrains, même à de fortes teneurs en argile (Radi, 1991).

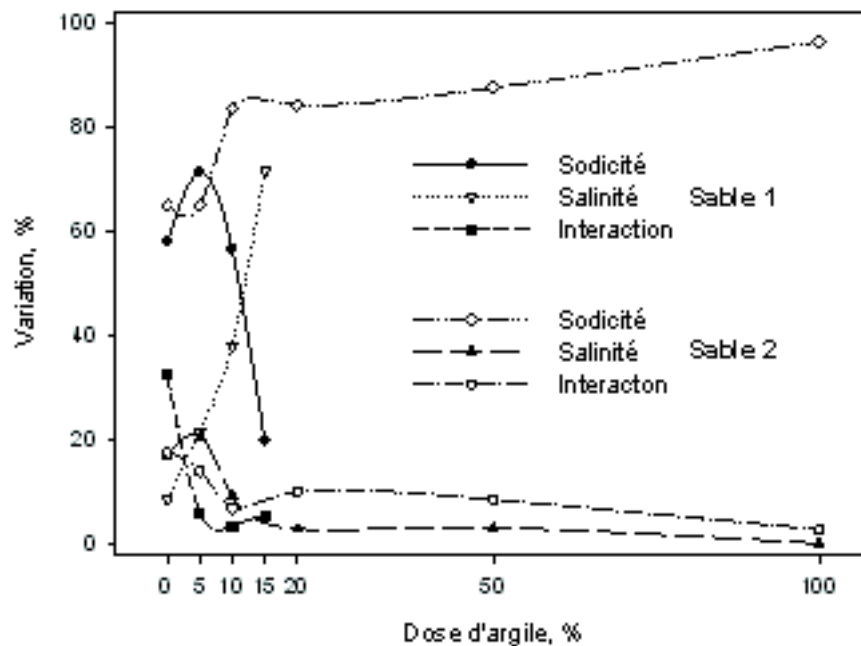


Fig. 55- Parts d'influence des différents facteurs sur les variations globales de la CHs pour les deux gammes de teneur en l'argile

Dans le cas du sable grossier (sable 2), l'effet de la sodocité augmente au fur et à mesure que la dose d'argile s'élève à l'inverse de celui de la salinité qui diminue.

Ainsi pour 100% d'argile, la sodocité explique près de 97% du comportement du substrat et la salinité seulement près de 0,35%. L'effet interaction suit les mêmes variations que la salinité mais dans des proportions sensiblement plus grandes. Ceci signifie que la sodocité est le principal facteur de colmatage de la porosité puisqu'elle permet au gonflement de l'argile de s'exprimer dans l'espace poral délimité par les grains de sable. Ceci est confirmé par d'autres travaux qui montrent que la solution saline peut faire varier d'un facteur 3 le gonflement de l'argile à un potentiel de l'eau proche de la saturation en eau (Tessier, 1984; Ruiz-Vera et Wu, 2006).

Pour analyser l'évolution de la CHs il est non seulement important de se référer à la taille modale des grains, mais aussi à la distribution granulométrique qui contrôle réellement l'espace poral. A cet effet Molle (2003) montre que plus les grains sont de petite taille et de granulométrie étalée, plus la CHs est faible. L'étalement de la granulométrie d'un sable est exprimé par le coefficient d'uniformité (CU).

Nous rappelons que le CU du sable 1 est de 1,47, alors que celui du sable 2 est de 1,32. Cela signifie que les deux sables ont un étalement granulométrique uniforme, bien que l'étalement du sable 1, le fin, soit relativement plus important que celui du sable 2, grossier. C'est pourquoi, les valeurs de la CHs obtenues pour le premier sable sont encore plus faibles que celles attendues compte tenu de sa taille modale. Ceci confirme une différence de comportement hydraulique entre les deux séries de mesure essentiellement liée aux éventails texturaux différents des deux sables.

Par ailleurs il est intéressant de comparer nos résultats avec ceux d'Halilat (1998). Avec un CU = 1.5, le sable utilisé l'auteur présente une granulométrie étalée qui se rapproche du sable 1 de notre étude. Notons que dans ce cas de figure, le sable est légèrement différent au plan textural mais également au plan morphologique puisque son faciès est à la fois ovale

et anguleux, alors qu'il est arrondi dans notre cas. A ce sujet, Chrétien (1986), travaillant sur la porosité de mélanges d'argile et de populations de sable de différentes granulométries et formes, conclut que les variations de la porosité ne sont dues ni à la nature de l'argile, ni au mode de préparation des échantillons, mais essentiellement aux différences d'éventail granulométrique du squelette. Nous pensons que le sable utilisé par Halilat de part sa forme et sa texture fine a joué un rôle favorable dans les propriétés d'hydratation et de gonflement des mélanges.

#### IV.2.3.2 Spécificité de l'argile de Maghnia

Il est à remarquer que, dans cette étude, les doses d'argile incriminées pour réduire fortement la conductivité hydraulique saturée, sont beaucoup plus faibles que dans les sols argileux. Ainsi Chrétien (1986), montre qu'il faut atteindre une teneur en argile de 30% pour assurer un remplissage de la porosité inter grains des sables. On ne peut donc comparer

directement une argile de gisement telle celle de Maghnia et une argile de sol, fut-elle une smectite. Pour Maghnia, les propriétés de gonflement sont tellement fortes qu'une dose de 10 à 12 % suffit à modifier complètement les propriétés. Ceci est en accord avec les résultats obtenus par Halilat et Tessier (2000). Par ailleurs, Tessier (1984) a montré que le comportement des argiles de gisement telles que les montmorillonites et celles de sols comme Béthonvilliers sont d'ampleur très différente. On ne peut donc comparer directement des argiles de sols d'origine sédimentaire à des argiles de gisement issu de l'altération d'origine volcanique (Belaroui et *al.*, 2004).

Pour les fortes concentrations salines ( $1000 \text{ cm}^+ \cdot \text{l}^{-1}$ ), il semble que les forces de cohésion entre les grains de sables sont fortement augmentées en présence de sels, de sorte que l'effondrement de l'assemblage des grains au cours des essais de conductivité hydraulique est plus limité qu'aux plus faibles concentrations en sels (10 et  $100 \text{ cm}^+ \cdot \text{l}^{-1}$ ). Cette propriété est vérifiée pour les valeurs du SAR allant jusqu'à 30.

Les argiles ont des propriétés de gonflement qui dépendent à la fois de leur pureté, de leur type minéralogique, mais aussi de la présence de substances associées qui sont en mesure d'orienter les propriétés, par exemple la présence de sels ou de carbonates (McIntyre et Loveday, 1979 ; Sally et David, 2004). En outre le mode de préparation de l'amendement argileux est important. Le fait de remanier un échantillon dans l'eau augmente considérablement ses propriétés d'hydratation. C'est la raison pour laquelle dans notre étude l'argile a été ajoutée à l'état sec, donc non remaniée dans l'eau, afin de limiter le colmatage de la porosité. Ceci s'apparente d'ailleurs à un protocole tel qu'utilisé traditionnellement au Maghreb et particulièrement en Algérie pour améliorer les propriétés des sols sableux (Toutain, 1974 ; Nasr, 2004).

Ainsi quand le sable est de granulométrie fine et étalée, il est possible d'évaluer la conductivité hydraulique de nos mélanges (Fig. 57). Dans ce cas, même avec des valeurs du SAR atteignant 30, ces conditions n'influencent pas de manière déterminante la conductivité hydraulique. Afin d'expliquer ce comportement nous pouvons nous référer aux caractéristiques du matériau utilisé. Ce dernier contient suffisamment de carbonates qui sont fortement associés à l'argile. Notre analyse est que, dans ces conditions, la présence de carbonates intimement associée à l'argile en contrôle une bonne partie des propriétés, même pour des valeurs du SAR relativement élevées de la solution d'imbibition.

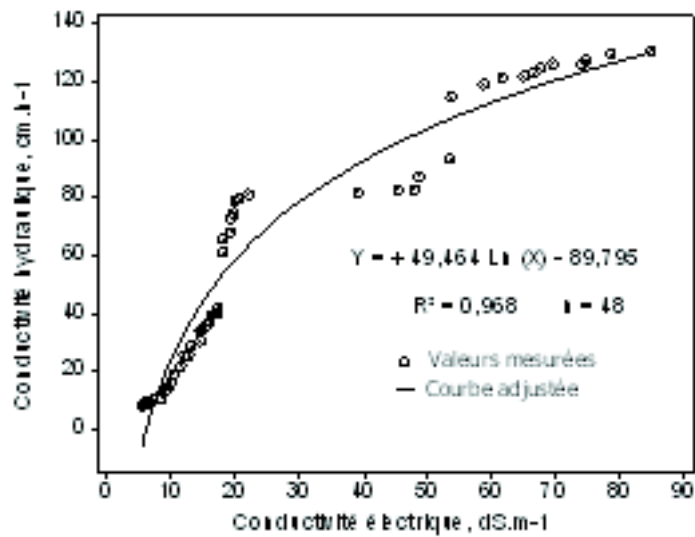


Fig. 56- Corrélation entre la conductivité hydraulique saturée et la conductivité électrique du mélange argile-sable 1

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cherché à comprendre le comportement de l'argile de Maghnia en tant qu'amendement minéral pour des sols essentiellement sableux soumis aux contraintes abiotiques de salinité et sodicité. L'argile de Maghnia, de par la présence de calcite intimement associée, est saturée avec du calcium. Dans ce cas, la présence de calcium en limite le gonflement. Il faut atteindre des valeurs du SAR de l'eau d'irrigation de 45 pour que la conductivité hydraulique en milieu saturé des mélanges s'approche de l'état d'imperméabilité. Ceci signifie sans doute que la proportion de sodium dans la solution du sol doit être élevée pour qu'il y ait un échange par le sodium significatif. Ceci est en rapport avec son taux de saturation par le sodium Na/CEC qui compte la plus faible valeur de 28,74% à l'état brut. La salinité a bien entendu un effet contraire à celui de la sodicité sur la conductivité hydraulique saturée, puisqu'elle tend à réduire les propriétés de gonflement de l'argile et donc à limiter le volume de l'argile au sein de la matrice sableuse. Il en résulte que la porosité d'assemblage des grains de sables n'est pas totalement remplie par l'argile assurant une certaine conductivité hydraulique saturée.

# Chapitre V Effets de la salinité et de la sodicité sur le comportement de la tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivée sur un sol sableux amendé par la bentonite

## Introduction

Dans ce chapitre nous abordons le sujet de l'amendement en bentonite sous un angle différent de celui adopté dans les chapitres précédents dans lesquels nous avons tenté d'appréhender les bases scientifiques qui nous permettent d'optimiser l'amendement argileux des sols sableux en tant que pratique traditionnelle. Nous projetons, dans ce chapitre, de reproduire les résultats déjà discutés sur un matériel biologique soumis aux mêmes conditions expérimentales et exposé naturellement aux mêmes contraintes abiotiques de salinité et de sodicité. Dans ce cas, le matériel végétal en l'occurrence la tomate industrielle (*Lycopersicon esculentum* Mill.), joue le rôle d'indicateur biologique de l'état du substrat dans lequel la plante va évoluer.

Certains éléments discutés dans les sections précédentes sont importants et méritent d'être reproduit dans ce chapitre, parmi lesquels, figure la question du choix de la bentonite. En effet, au chap. II, p. 67, nous avons adopté un classement des échantillons de bentonite étudiés, sur la base de critères de qualité d'optimisation de l'amendement, qui a donné par ordre qualitatif décroissant: Maghnia 1, Mostaganem 14, Maghnia 2 et Mostaganem 11. Il nous semble important de vérifier ces données sur un indicateur biologique, la tomate, en effectuant une comparaison entre substrats contenant respectivement les deux premières bentonites : Maghnia 1 et Mostaganem 14. Ce qui reviendrait à ne faire varier dans l'expérience que l'échantillon de bentonite, tout facteur par ailleurs constant, pour analyser son influence sur l'état de la plante et par conséquent l'efficacité de l'amendement. Ceci est particulièrement intéressant, dans la mesure où, les deux échantillons proviennent des deux principaux gisements de bentonite exploités en Algérie : *Maghnia* et *Mostaganem*. Cette approche comparative va donc faire l'objet d'une première partie de ce chapitre, qui aboutira à la plus optimale des deux formes d'argile : *Maghnia 1* ou *Mostaganem 14*. Dans une seconde partie du chapitre, nous étudierons dans le substrat distingué, les effets de la salinité et de la sodicité sur le comportement morphologique et racinaire de la tomate. Ceci, nous permettra de vérifier les résultats de l'évolution édaphique et ses répercussions sur la plante soumise aux deux contraintes abiotiques étudiées. Il est important de tenir compte de la tolérance du matériel végétal choisi vis à vis de ces contraintes, cela en vue d'éviter de le mettre dans un état de choc osmotique ou de dégradation permanente, ce qui n'est pas en priorité le but recherché (Zekri, 1993; Walker et al., 1993) mais plutôt, la manière avec laquelle la plante répond au stress salin/sodique. C'est pourquoi nous avons opté pour un stress et non pas une irrigation saline continue. Cet itinéraire d'*indication biologique*

constitue un outil précieux dans l'évaluation agrobiologique de l'opération d'amendement bentonitique.

## V.1 Comportement morphologique et racinaire de la tomate cultivée dans des mélanges d'un sable et deux formes de bentonite

### Objectif de l'étude

Le but de ce travail expérimental est d'effectuer une étude comparative entre les effets des deux bentonites de Maghnia 1 et de Mostaganem 14 sur les propriétés physiques d'un sol sableux. Pour cela, une seule dose, de 10% du poids sec de ces deux types de bentonite est ajoutée à un sol sableux du plateau de Mostaganem (Fig.58). L'effet des deux bentonites est mis en évidence grâce à un indicateur biologique, la tomate (*Lycopersicon esculentum Mill.*), soumise à un stress salin de NaCl+CaCl<sub>2</sub> de concentration 100 et 300 cmol<sup>+</sup>.l<sup>-1</sup>.



Fig. 57- Schéma de principe de l'expérience de comparaison

### V.1.1 Matériels et méthodes

---

#### V.1.1.1. Matériels d'étude

##### V.1.1.1.1 Sable

Les données de caractérisation du sable utilisé dans cette expérimentation figurent dans le chapitre II. Il s'agit du sable 1, le plus fin et dont l'étalement est le plus important (§chapitre II, p. 46).

##### V.1.1.1.2 Bentonites

La caractérisation des deux formes de bentonite : Maghnia 1 et Mostaganem 14 sont également développées dans le chapitre II (p. 67)

##### V.1.1.1.3 Matériel végétal

Nous avons choisi la tomate comme matériel végétal, c'est une plante annuelle appartenant à la famille des solanacées. Nous avons utilisé une variété « hybride F<sub>1</sub> », appelée Lydia dont les caractéristiques sont présentées au tableau 19 :

**Tableau 19 – Caractéristiques de la culture utilisée (Wacquand, 1995).**

Variété	Lydia
Origine	France
Type croissance	Déterminée
Feuillage	Peu foncé globuleux à cordiforme, lisse, collet vert avant maturité, trace à maturité, 3-5 lobes, régulier, bien coloré, fermeté moyenne et calibre principal 57- 67.
Fruits / bouquet	3 à 5
Récolte	Après 80 jours suivant le semis
Résistance	VMC - Verticillium ; Fusarium ; Stimiolium.

### **V.1.1.2 Méthode d'étude**

#### **V.1.1.2.1 Dispositif expérimental**

Le matériel végétal est cultivé sur des pots en forme de cylindre disposés selon la méthode des blocs complets aléatoires avec 3 répétitions. L'ensemble des pots est irrigué à l'aide de la solution nutritive de Hoagland (Hoagland et Arnold, 1938), moyennant une fréquence de deux jours.

Pour pouvoir prélever les échantillons de substrats et de plants nécessaires aux analyses, nous avons prévu le dispositif en deux fois en vue de sacrifier les pots juste après l'application du stress durant chacun des deux stades de développement. Les prélèvements d'échantillons des substrats sont effectués dans la couche intermédiaire au milieu de la rhizosphère (Fig.59).

#### **V.1.1.2.2 Serre expérimentale**

Nous avons utilisé une serre en bois couvrant une superficie de  $(2 \times 1,5) \text{ m}^2$  couverte d'un film plastique de type Sonatrach[7]. La température moyenne relevée dans la serre varie entre 25 et 33°C. En valeurs moyennes, l'humidité relative compte 70% et le rayonnement journalier 13 heures.



Fig. 58 - Schéma de localisation des prélèvements des échantillons de substrats par rapport à la rhizosphère

### V.1.1.2.3 Localisation temporelle du stress salin-sodique

Les moments choisis pour stresser la plante doivent être localisés dans le temps par rapport aux stades de développement de la plante (Fig.60). Le principe consiste à choisir le stade de développement durant lequel, la plante exprime le plus clairement possible sa réponse au stress. C'est en fait, les stades juvéniles qui permettent une telle clarté de réponse compte tenu d'une forte sensibilité physiologique de la plante aux contraintes abiotiques (Katerji<sup>1</sup>, 1994 ; Maas et al., 1986). Pour cela, nous avons choisi un stade juvénile qui est la préfloraison et un stade post juvénile très sensible aux aléas environnementaux qui est le début de la nouaison (Bamouh, 1999 ; Guichard et al, 2001). Entre ces deux stades, la plante

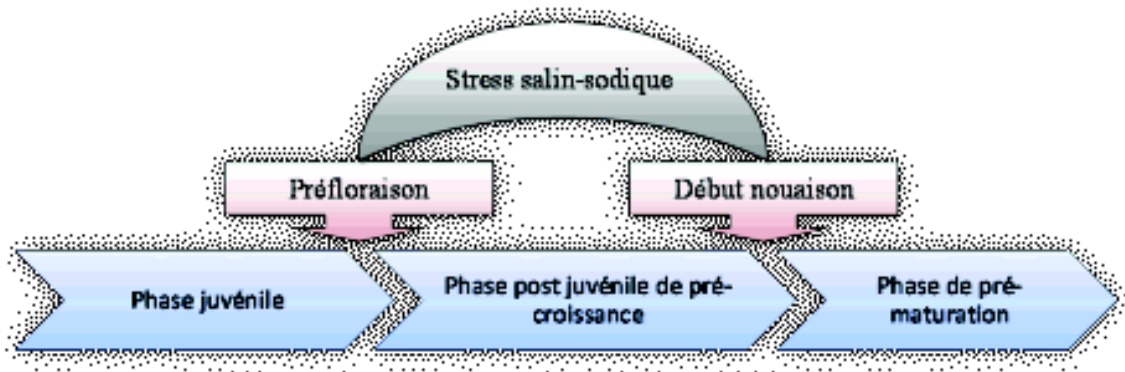


Fig. 59 - Repérage de l'instant d'application du stress par rapport aux principaux stades de développement de la tomate

établit l'architecture de base de son système racinaire. L'état de l'enracinement, dans ce cas, a un effet extrêmement important dans le développement futur de la culture (Mitchell et al, 1991).

Le stress de la plante consiste, dès l'apparition du stade de développement considéré, à l'irriguer à l'aide de la solution saline durant 7 jours avec la même fréquence de 2 jours. Juste après le stress, les pots sont sacrifiés pour prélever les échantillons des substrats et des plants.



#### V.1.1.2.4 Solution nutritive

La solution nutritive (tableau 20) est préparée suivant la composition décrite par Hoagland et Arnold (1938). L'arrosage des pots est effectué dès le semis avec de l'eau distillée jusqu'à l'apparition des deux premières feuilles. A partir de là, l'arrosage se fait chaque deux jours à l'aide de la solution nutritive pour assurer une bonne assimilation des éléments nutritifs.

Nous avons estimé la réserve facilement utilisable (RFU) à partir de 3 échantillons secs prélevés sur chacun des deux matériaux. La RFU est égale au  $\frac{1}{3}$  de la différence des poids obtenus respectivement 48 heures après la saturation et après passage à l'étuve à 105°C pendant 24 heures. La réserve facilement utilisable est la quantité d'eau stockée par le substrat qui peut être facilement mobilisée par la plante.

Tableau 20 – Composition chimique de la solution nutritive (Hoagland et Arnold, 1938)

Nature	Composants	g.l <sup>-1</sup>	Nature	Composants	g.l <sup>-1</sup>
Macro-éléments	(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ca <sub>4</sub> H <sub>2</sub> O KNO <sub>3</sub> NO <sub>3</sub> NH <sub>4</sub> - (NH <sub>4</sub> Cl) SO <sub>4</sub> Mg 7H <sub>2</sub> O PO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> K <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> HK <sub>2</sub> 3H <sub>2</sub> O	12,98 19,19 2,10 6,05 5,44 4,42	Micro-éléments	Cu SO <sub>4</sub> 5H <sub>2</sub> O Zn SO <sub>4</sub> 5H <sub>2</sub> O BO <sub>3</sub> H <sub>3</sub> MO <sub>7</sub> O <sub>24</sub> NH <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> Fe N <sub>2</sub> NaO <sub>8</sub>	0,18 0,017 0,02 0,28 0,28 0,005

Les doses d'irrigation apportées à la culture (Tableau 21), correspondent à 60% de la RFU des matériaux pour les deux stades : préfloraison et début nouaison (El Fadl *et al.*, 1990 ; Adams et Holder, 1992).

Tableau 21 – Doses d'irrigation appliquées sur les trois mélanges

Substrat	Doses, ml
Sable	128,57
Sable + bentonite Mostaganem 14	329,34
Sable + bentonite Maghnia 1	287,79

#### V.1.1.2.5 Solution saline

La solution saline est composée de deux sels : le chlorure de sodium (NaCl) et le chlorure de calcium (CaCl<sub>2</sub>). Les solutions de NaCl et CaCl<sub>2</sub> sont préparées séparément puis mélangées à volume égal (V/V) en vue d'obtenir deux concentrations de 100 et 300 cmol<sup>+</sup>.l<sup>-1</sup> (Tableau 22).

Concentration cmol <sup>+</sup> .l <sup>-1</sup>		100	300
NaCl	g.l <sup>-1</sup>	58,74	176,22
CaCl <sub>2</sub>		55,74	167,22
SAR		14	24

Tableau 22 – Composition de la solution saline

Le mélange sable-bentonite a été effectué manuellement de manière à obtenir un substrat le plus homogène possible selon le protocole mis au point par Kheyrahi et Monnier (1968) et Fiès (1971), qui consiste à introduire le mélange par couches minces successives.

La quantité de bentonite ajoutée au sable est de 400 g par pot et correspond à une dose de 10% du poids de sol sec. Les pots utilisés en pvc (chlorure de polyvinyle) possèdent un diamètre de 10,5 cm et une hauteur de 18 cm. Au fond de chaque pot, nous avons placé une couche de graviers fins en vue d'assurer un bon drainage de l'eau d'irrigation.

#### V.1.1.2.6 Méthodes d'analyses

pH : par le biais du pH-mètre sur extrait aqueux de rapport 2/5.

Conductivité électrique : par le biais du conductimètre sur extrait de pâte saturée.

### V.1.2 Résultats et discussions

#### V.1.2.1 pH

L'évolution des valeurs du pH est pratiquement similaire pour les deux stades de développement (Fig.61). En effet, pour le traitement témoin, le mélange avec la bentonite de Mostaganem (SMs14) enregistre la plus grande valeur du pH (8,47) au stade de début nouaison par rapport au substrat sableux qui marque la plus faible valeur (7,49) au stade de préfloraison.

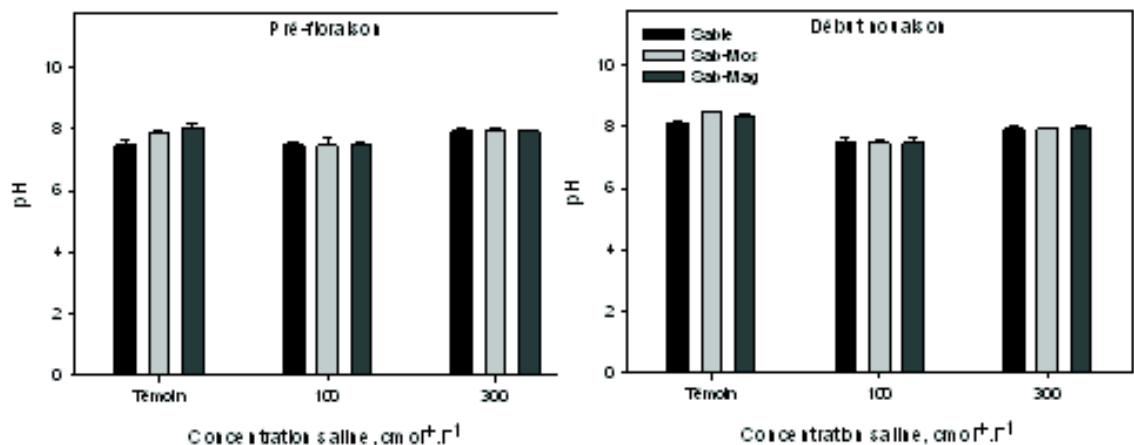


Fig. 60- pH des substrats en fonction de la salinité et du stade de développement

Les valeurs de ce paramètre pour les traitements de 100 et 300  $\text{cmol}^+.\text{l}^{-1}$ , sont plus faibles par rapport au traitement témoin et augmentent légèrement avec l'accroissement de la concentration saline. Il n'apparaît pas de différences significatives entre les trois substrats : sable, SMs14 et SMg1 (mélange sable avec la bentonite de Maghnia). L'analyse de la variance à deux critères de classification (Tableau 23), montre un effet significatif des deux paramètres : substrat et salinité dans les variations globales. Néanmoins, les parts d'influence de ces deux paramètres sont proches pour les deux stades de développement, ce qui est conforme à la figure 61, mais sont aussi faibles (en moyenne 30 %). Ceci est lié,

Source de variation	Taux de variation, %		Signification
	Pré-floraison	Début nouaison	
Substrat	29,57	<b>31,21*</b>	p < 0,0005
Salinité	<b>32,90</b>	26,65	p < 0,0005
Interaction	26,25	35,77	p < 0,0005
Résiduel	11,29	6,36	
Coefficient de variation	1,35 %	1,20 %	

Tableau 23 – Part des différents facteurs dans les variations globales du pH

\*les valeurs en gras indiquent l'effet dominant

vraisemblablement à l'effet interaction qui enregistre respectivement 26,25 et 35,77 % respectivement pour le premier et le second stade. L'effet interaction paraît évident si on considère le rôle actif de l'argile (substrat) dans les échanges avec la solution du sol et la composition chimique de la solution saline (salinité). De manière globale, les valeurs du pH étant en deçà du seuil de 8,5 susceptible d'affecter la croissance et le développement du système racinaire n'affectent que très peu ou pas l'activité physiologique de la culture (Lakhdari, 1986).

### V.1.2.2 Conductivité électrique

Les résultats de la CE (Fig. 62), montrent également une évolution similaire entre les deux stades de développement avec de faibles différences en proportions. Dans chacun des deux stades et pour un substrat donné, la CE augmente avec l'augmentation de la concentration saline.

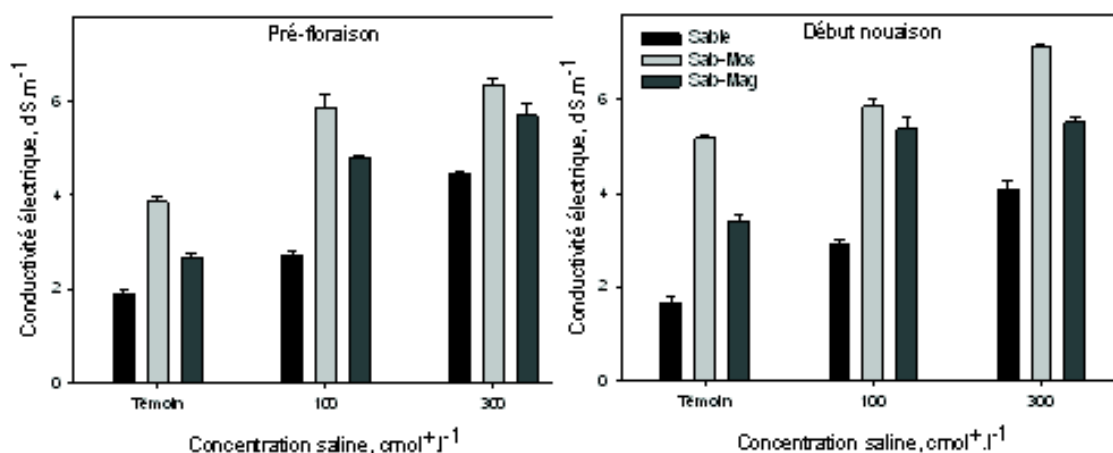


Fig. 61- CE des substrats en fonction de la salinité et du stade de développement

Pour un traitement donné, la CE avec les plus faibles valeurs dans le substrat sableux, enregistre les plus grandes valeurs dans le mélange SMs14. Les valeurs de la CE sont intermédiaires entre les deux derniers substrats dans le mélange SMg1.

L'analyse de la variance (Tableau 24), montre une prédominance de l'effet salinité (55,11%) sur les variations globales pour le premier stade de préfloraison alors qu'une prédominance de l'effet substrat (33,13%) apparaît dans le second stade de début-nouaison. L'effet substrat reste invariable entre les deux stades de développement, alors

que celui de la salinité diminue du premier (55,11) au second stade (30,84). Ceci est de nature à expliquer une forme d'atténuation des effets de la salinité amplifiée dans le second stade. L'effet interaction passe de 11,13 à 35,42 % du premier au second stade de développement. Cela est dû à une certaine amplification de l'activité d'échange entre le système racinaire et la solution du sol favorisée par le rôle actif de la bentonite dans les phénomènes d'adsorption (substrat) et par voie de conséquence ceux d'échanges. Dans ce cas de figure, l'accroissement de l'effet interaction du premier au second stade montre que ces phénomènes se manifestent plus intensément au début de la nouaison, eu égard au système racinaire plus dense, et à une certaine forme d'adaptation de la plante à la salinité/sodicité qui ne peut s'effectuer que via ces phénomènes d'échange dans la rhizosphère. De ce point de vue, le substrat par son complexe d'échange fait l'objet de la face complémentaire de ce qui se déroule dans le système racinaire. Par ailleurs, les valeurs de la CE dans le substrat SMg1 sont plus faibles que celles dans le substrat SMs14, ce qui vraisemblablement est lié, à cet effet d'atténuation des effets de la salinité/sodicité dont se caractérise la bentonite de Maghnia. Ceci s'apparente avec la forme naturelle calcique de cette bentonite contrairement à celle de Mostaganem qui est naturellement sodique.

Source de variation	Taux de variation, %		Signification
	Pré-floraison	Début nouaison	
Substrat	33,12	<b>33,13</b>	p < 0,0005
Salinité	<b>55,11</b>	30,84	p < 0,0005
Interaction	11,13	35,42	p < 0,0005
Résiduel	0,63	0,61	
Coefficient de variation	3,42 %	3,36 %	

Tableau 24 – Part des différents facteurs dans les variations globales de la CE

Les résultats de la densité racinaire (Photo 6), montrent de prime abord que les plants de tomate installés dans le SMs14 sont affectés par la contrainte de salinité/sodicité et enregistrent les plus faibles densités racinaires. En parallèle, les plants cultivés respectivement dans les substrats sable et SMg1 s'équivalent en matière de développement racinaire pour le traitement témoin, mais il apparaît clairement que la section de la tige de la plante est plus importante dans le mélange SMg1. Pour les traitements à 100 et 300  $\text{cmol}^+ \cdot \text{l}^{-1}$ , les plants développés dans le SMg1 présentent une densité racinaire largement importante par rapport à ceux cultivés dans le substrat sableux. Cette remarque peut encore être perçue par la couleur grisâtre du système racinaire indicatrice d'une forme d'atteinte par la salinité/sodicité qui se manifeste par une sorte de chlorose remarquée aussi aux niveaux des feuilles des cultures (Rochdi et al., 2005).

A ce stade de la discussion, il n'est pas nécessaire d'approfondir davantage l'analyse étant donné que les données de la densité racinaire (photo 6) additionnellement à celles du pH et de la CE, montrent clairement que le substrat composé de la bentonite de Maghnia 1 (SMg1) permet au système racinaire de la culture de s'adapter de manière spectaculaire à une

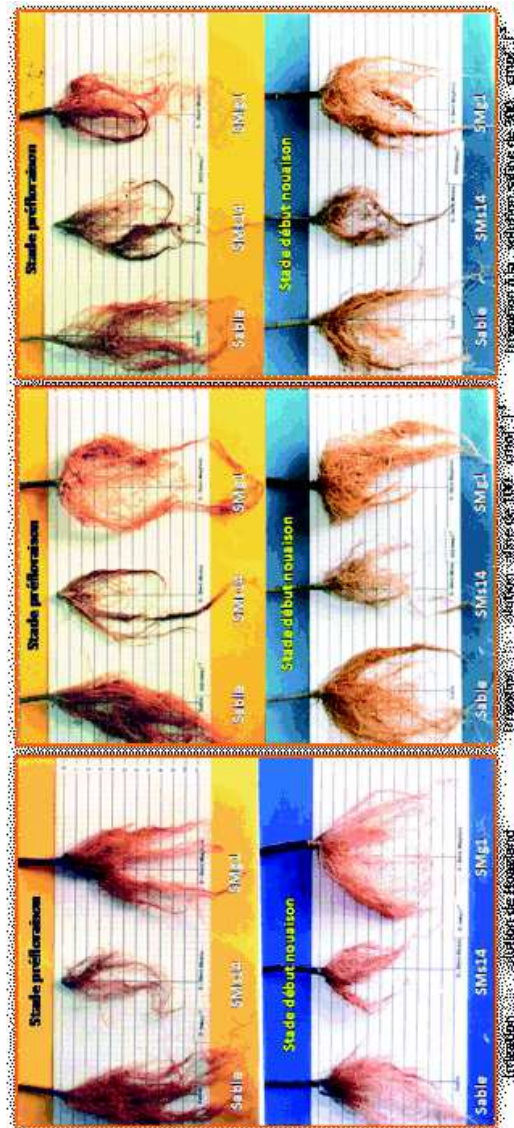


Photo 6 – Densité racinaire des plants de tomate en réponse à la salinité en fonction du type de bentonite ajouté au sol sableux

concentration aussi importante que  $300 \text{ cmol}^+ \cdot \text{l}^{-1}$ . Ceci nous conduit à retenir dans la suite de notre travail seulement la bentonite de Maghnia 1 qui présente naturellement, outre son rôle d'amplification de la capacité de rétention en eau du mélange, des caractéristiques requises à l'atténuation de l'effet de la salinité/sodicité sur le substrat et la plante. C'est pourquoi, nous allons dans la prochaine section de ce chapitre étudier le comportement morphologique et racinaire à deux stades de développement juvéniles de la tomate soumise aux deux contraintes de salinité et sodicité, installée dans un mélange de sable et de bentonite de Maghnia (SMg1) avec une dose de 10 % de poids de sol sec.

## V.2 Effets de la salinité et de la sodicité sur le comportement de la tomate cultivé dans des

## mélanges de sable et de bentonite de Maghnia 1

### Objectif de l'étude

Le but de ce travail expérimental est d'étudier les effets d'un stress salin sur les caractéristiques morphologiques et la densité racinaire d'une culture de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill ; variété Rio-Grande) cultivé en pots sur deux substrats, l'un de sable et l'autre de sable mélangé à 10% de bentonite en poids sec. Le stress salin est effectué avec 3 concentrations d'une solution de NaCl+CaCl<sub>2</sub> avec 100, 200 et 300 cmol<sup>+</sup>.l<sup>-1</sup>. La solution de Hoagland (Hoagland et Arnold, 1938) est utilisée comme traitement témoin.

De même que dans l'étude précédente, la plante est stressée pendant 7 jours au début de chacun de ses deux stades de développement : 4-5 feuilles et début de floraison. Après l'apport de la solution saline, des prélèvements d'échantillons de sol sont effectués en zone racinaire pour déterminer le pH et la conductivité électrique. Dans chaque bloc les plants sont prélevés pour déterminer leurs teneurs en eau, la taille et la densité de leurs systèmes racinaires.

### V.2.1 Matériels et méthodes

---

#### V.2.1.1 Matériels

Le sable utilisé pour cette étude expérimentale est le sable 1. Il s'agit, comme l'étude précédente, du matériau le plus fin des deux sables que nous avons étudiés (§ chap. II, p. 46).

La bentonite provient du gisement de Maghnia. Il s'agit de l'échantillon Maghnia 1 (§ chap. II, p. 67).

Le matériel végétal est la tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Nous avons utilisé pour cette expérimentation un « hybride F<sub>1</sub> », variété Rio Grande, originaire d'Amérique du nord. Elle est sensiblement tolérante à la salinité et peut supporter une conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée du sol de 2,5 dS.m<sup>-1</sup> (Dautrebande, 1982), ce seuil peut aller jusqu'à 3,5 dS.m<sup>-1</sup> (Skiredj, 2005).

Nous avons utilisé la même serre en bois que dans l'expérience précédente, néanmoins les conditions climatiques étaient relativement différentes. En effet, la température oscillait en moyenne entre 29 et 35°C à l'intérieur de la serre et en valeurs moyennes, l'humidité relative comptait 64% et le rayonnement journalier 14,5 heures.

#### V.2.1.2 Méthodes

Dans cette étude, nous avons utilisé comme dans la précédente, la dose optimale de bentonite, en l'occurrence 10%. Les mélanges sont mis dans des vases de végétation en pvc de diamètre 8,7 cm et de hauteur 13 cm. Le fond des pots est tapissé de gravier pour assurer un bon drainage de l'eau.

Avant de semer, nous avons effectué une pré-germination des graines dans des boites de pétri. Après 10 jours de germination, 3 plantules sont transplantées dans chaque pot puis une irrigation à l'eau distillée est apportée tous les deux jours durant une vingtaine de jours

pour compenser les pertes en eau par évapotranspiration. Au delà, les plantes reçoivent la solution nutritive de Hoagland (Hoagland et Arnold, 1938) avec la même fréquence.

Le dispositif expérimental adopté est celui des blocs complets aléatoires avec 3 répétitions. Il comprend 24 pots par stade : 3 répétitions, 2 substrats (sable et mélange) et 4 traitements (0, 100, 200 et 300  $\text{cmol}^+ \cdot \text{l}^{-1}$ ). Par rapport à l'étude précédente, nous avons choisi de stresser le matériel végétal au cours de deux stades tous les deux juvéniles : 4-5 feuilles et début de la floraison, pour l'hyper sensibilité qu'exprime une culture durant les phases juvéniles de son développement (Dumbroff et Cooper, 1974 ; Mougou, 1984 ; Lakhdari, 1986; Murillo-Amador et al., 2006 ).

Le stress de la plante consiste, dès l'apparition du stade de développement considéré, à l'irriguer à l'aide de la solution saline durant une semaine avec une fréquence de 2 jours. Après le stress, les pots sont sacrifiés pour prélever les échantillons des substrats et des plants.

L'estimation de la RFU, sur la base de la méthode décrite précédemment, est faite à partir de 3 échantillons secs de 200 g prélevés sur chacun des deux matériaux. Les doses d'irrigation apportées à la culture (Tableau 25), correspondent à 30 et 60% de la RFU des matériaux respectivement pour les deux stades : 4-5 feuilles et début floraison (Mougou, 1984 ; El Fadl et al., 1990 ; Mitchell et al., 1991 ).

Stade de développement		Dose d'irrigation, ml	
		4-5 feuilles	Début floraison
Quantité d'eau (ml)	Sable	39,90	79,80
	Mélange	82,33	164,67

Tableau 25 – Quantités d'eau apportées en fonction du substrat

Pour stresser la plante, nous avons également utilisé une solution saline similaire à la précédente moyennant trois concentrations salines de 100, 200 et 300  $\text{cmol}^+ \cdot \text{l}^{-1}$  (Tableau 26). Les trois concentrations utilisées correspondent à des valeurs du SAR égales respectivement à 14, 20 et 24. Autrement dit, quand la plante est soumise à un stress salin de 100, 200 ou 300  $\text{cmol}^+ \cdot \text{l}^{-1}$ , elle est simultanément soumise aux SAR respectifs de 14, 20 et 24.

Concentration $\text{cmol}^+ \cdot \text{l}^{-1}$		100	200	300
NaCl	g.l <sup>-1</sup>	58,74	117,48	176,22
CaCl <sub>2</sub>		55,74	111,48	167,22
SAR		14	20	24

Tableau 26 – Composition chimique de la solution saline

Pour la détermination du pH et de la conductivité électrique (CE) des matériaux étudiés, nous avons prélevé les échantillons en pleine zone racinaire tout comme dans le cas de l'étude précédente (voir Fig.59, p. 106). Le pH et la conductivité électrique sont mesurés respectivement à l'aide d'un pH-mètre et d'un conductimètre sur extrait de pâte saturée.

La teneur en eau de la plante est obtenue selon la formule suivante :

$$\text{Teneur en eau \%} = \frac{P_f - P_s}{P_s} \quad (\text{Heller, 1981})$$

$P_f$  : poids frais de la plante en grammes

$P_s$  : poids sec de la plante en grammes

La densité racinaire a été obtenue à l'aide d'un logiciel de traitement d'image ImageJ, qui permet à partir des photos des racines, d'estimer la surface racinaire en pourcentage relatif de la surface totale par référence à la différence de couleur entre le vide et la masse racinaire (Fig.63).

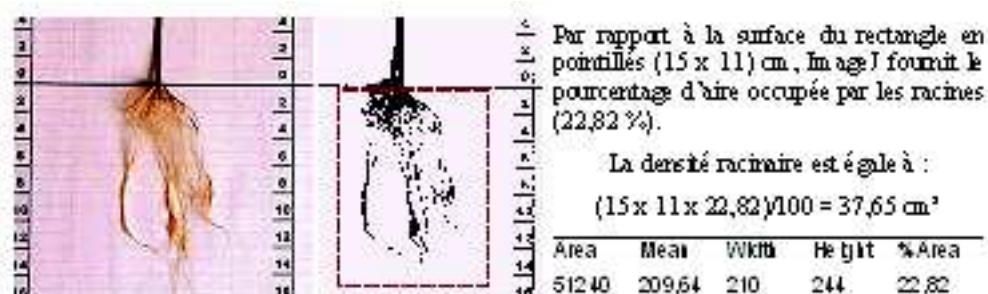


Fig. 62- Exemple de détermination de la surface racinaire en utilisant ImageJ

## V.2.2 Résultats et discussions

### V.2.2.1 Résultats

#### V.2.2.1.1 pH

La figure 64 montre qu'au stade 4-5 feuilles, le pH baisse dans les deux substrats, le sable et le mélange, sous l'effet de la concentration saline de  $100 \text{ cmol}^+ \cdot \text{l}^{-1}$  par rapport au témoin. L'effet des deux autres concentrations de 200 et  $300 \text{ cmol}^+ \cdot \text{l}^{-1}$ , entraîne en revanche, une augmentation de ce paramètre dans les deux substrats.

Au stade de début floraison, une évolution similaire est observée.

Pour les deux stades de développement, les valeurs du pH dans le mélange sont relativement plus élevées que celles observées dans le sable, mais dans l'ensemble, c'est les valeurs enregistrées avec la concentration saline de  $300 \text{ cmol}^+ \cdot \text{l}^{-1}$  dans le mélange qui sont les plus élevées. Ces dernières sont susceptibles d'affecter la nutrition de la plante quant elle est soumise au stress salin.



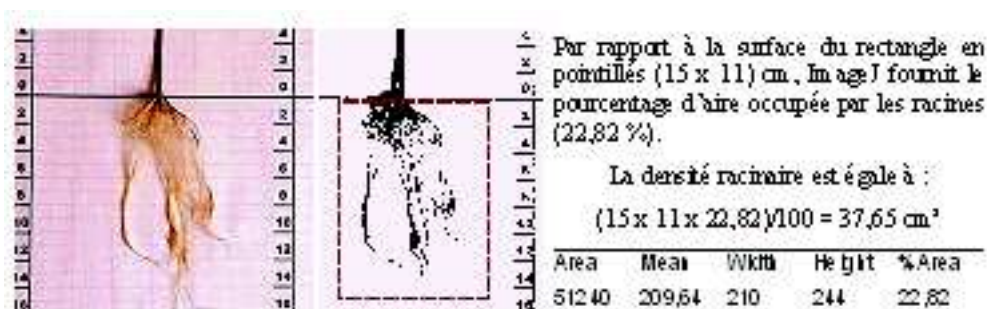


Fig. 63– pH en fonction des substrats et de la concentration saline pour deux stades de développement de la plante, 4 -5 feuilles et début floraison

L'analyse de la variance à deux critères de classification révèle un effet hautement significatif aussi bien du substrat que celui de la salinité (Tableau 27). La part d'influence de la salinité compte 48 % des variations globales du pH et celle liée au substrat est de 41 %.

Tableau 27 – Part des différents facteurs dans les variations globales du pH

Source de variation	Taux de variation, %	Signification
Salinité	48,07	p < 0,01
Substrat	41,02	p < 0,01
Résiduel	10,91	
CV = 3,52 %		

### V.2.2.1.2 Conductivité électrique

Les résultats de la conductivité électrique (CE) (Fig. 65), permettent de voir les effets de l'irrigation à l'eau salée sur la salinité des substrats pendant la période de stress de la plante. Pour les deux stades de développement de cette dernière, ils montrent une légère augmentation de la CE suite à l'augmentation de la concentration saline par rapport au témoin. Néanmoins, les valeurs enregistrées dans le mélange sont plus élevées que celles dans le substrat sableux.

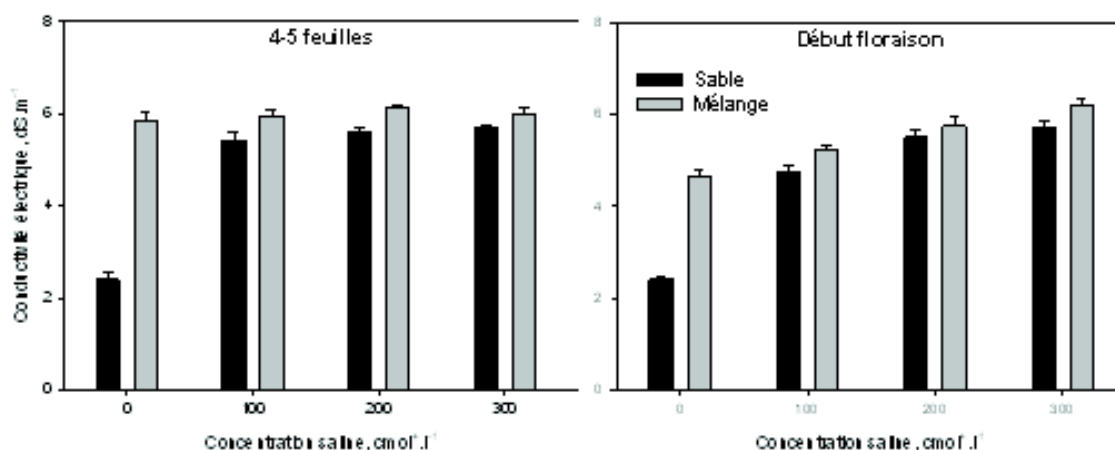


Fig. 64– Conductivité électrique en fonction des substrats et de la concentration saline pour les deux stades de développement

L'analyse de la variance (Tableau 28), montre une prédominance de l'effet de la salinité sur les variations globales de la CE (52,59 %) par rapport à celui du substrat (31,84 %). En

effet, il est important de remarquer que les valeurs de ce paramètre sont comprises dans l'intervalle : 4 à 6 dS.m<sup>-1</sup>. Cette marge est relativement élevée si l'on se réfère à 4 dS.m<sup>-1</sup> comme seuil à partir duquel un matériau est considéré comme salé (Boulaïne, 1978). Dans la littérature, ce seuil de salinité des sols n'est pas fixe puisqu'il peut être égal à 7 dS.m<sup>-1</sup> (Durand, 1973) et peut même atteindre 8 dS.m<sup>-1</sup> (Aubert, 1978). Il importe de rappeler que quelque soit son importance, cet état de contrainte du à la salinité n'est pas continu, étant donné que la culture n'est stressée que pendant les 7 premiers jours du stade de

Tableau 28 – Part des différents facteurs dans les variations globales de la CE

Source de variation	Taux de variation, %	Signification
Salinité	52,59	p < 0,01
Substrat	31,84	p < 0,05
Résiduel	15,57	
CV = 5,57 %		

développement étudié. Cela n'empêche pas que les données de la CE soient utiles pour discuter des effets du stress sur les caractéristiques édaphiques et leurs répercussions sur le comportement de la culture sur le plan agrobiologique.

### V.2.2.1.3 Teneur en eau de la plante

Les résultats de la teneur en eau (Fig.66), montrent pour les deux stades de développement, une diminution de ce paramètre suite à l'augmentation de la concentration saline dans les deux substrats. Néanmoins, les valeurs de la teneur en eau dans le substrat amendé sont plus importantes que celles dans le sable.

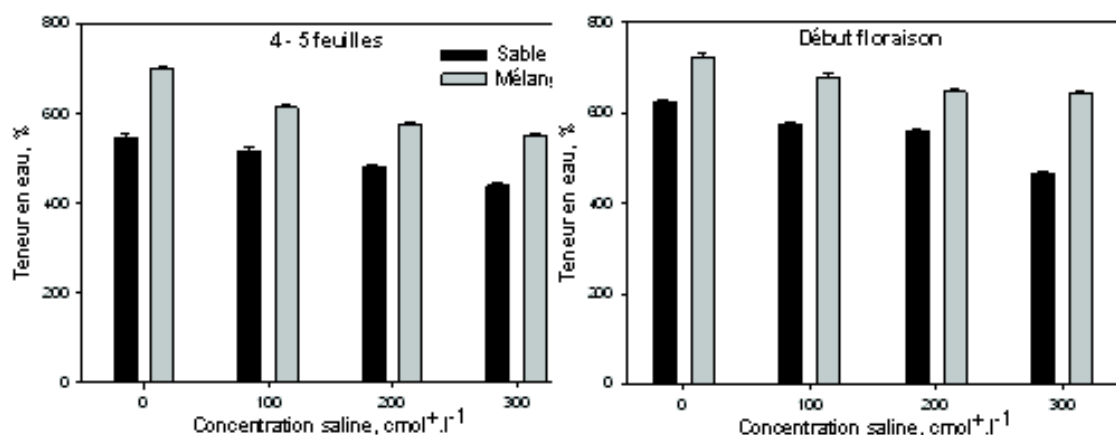


Fig. 65 – Teneur en eau en fonction des substrats et de la concentration saline pour les deux stades de développement

Les valeurs de teneur en eau sont plus élevées pour le stade de début floraison par rapport à celui de 4-5 feuilles. L'évolution de la teneur en eau de la plante pour les deux stades de développement, fait ressortir donc, une plus grande capacité de la plante à mobiliser l'eau dans le substrat amendé par rapport au sable. En effet, la teneur en eau pour le traitement témoin dans le mélange varie de 700,7 à 722,5 % respectivement pour

le premier et le second stade de développement, ce qui est en accord avec la littérature qui rapporte une teneur en eau moyenne de 700 % pour la tomate (Heller, 1981). Par rapport à ce seuil, les valeurs enregistrées pour le sable sont plus faibles : 548 et 622 % respectivement pour les deux stades. Ces dernières valeurs correspondent à des diminutions respectives de l'ordre de 22 et 14 % par rapport à celles enregistrées dans le mélange. C'est donc, l'effet du substrat (Tableau 29), qui contrôle en majorité (64,87 %) les variations de la teneur en eau de la plante via les propriétés d'hydratation et de gonflement propre à la bentonite dans le mélange. Dans ce cas de figure, la salinité ne contrôle que 31,48 % des variations de ce paramètre.

Tableau 29 – Part des différents facteurs dans les variations globales de la teneur en eau

Source de variation	Taux de variation, %	Signification
Salinité	31,48	p < 0,01
Substrat	64,87	p < 0,01
Résiduel	3,65	
CV = 3,54 %		

### V.2.2.1.4 Caractéristiques morphologiques de la plante

#### a. Hauteur des plants

Les résultats de la hauteur de la partie aérienne de la plante exprimée en cm et de sa densité racinaire exprimée en cm<sup>2</sup> sont représentés aux figures 67 et 68.

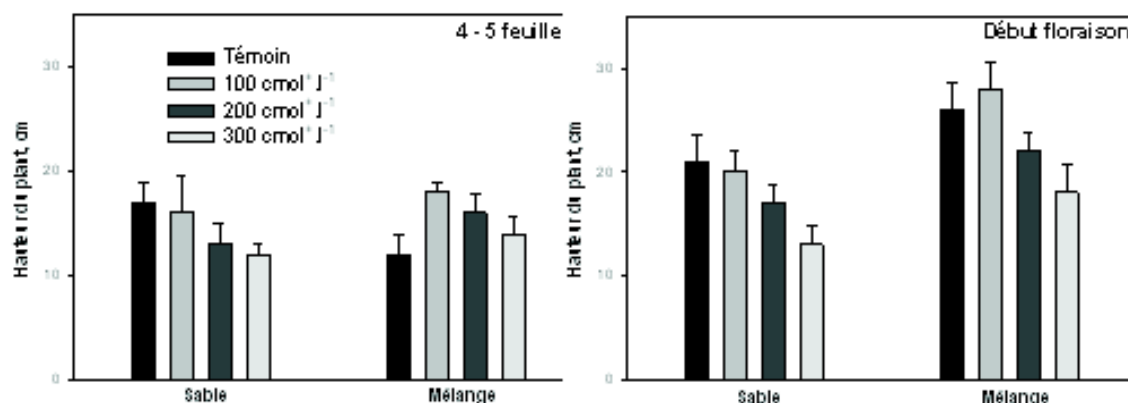


Fig. 66– Hauteur de la partie aérienne de la plante (cm) en fonction des substrats et de la concentration saline pour les deux stades de développement

Globalement (Fig.67), la hauteur des plants diminue suite à l'augmentation de la concentration saline à l'exception du traitement témoin dans le mélange. De même, elles sont plus élevées dans le second stade (début floraison) par rapport au premier (4-5 feuilles). Il est intéressant d'analyser maintenant, les résultats pour chacun des deux stades de développement étudiés.

#### Stade 4 - 5 feuilles

Dans le mélange (Fig. 67), les valeurs de ce paramètre sont relativement plus importantes que celles obtenues dans le sable. Dans ce cas, la faible valeur du témoin par rapport aux autres traitements, exprime une certaine sensibilité de la culture liée probablement au potentiel matriciel de l'eau qui fait qu'à teneurs égales, la plante doit extraire l'eau avec

davantage d'énergie par rapport au substrat sableux. Ce phénomène se présente aussi pour le second stade de début de floraison.

### Stade début floraison

Par rapport au témoin, nous observons (Fig. 67), que le stress salin affecte la hauteur des plants beaucoup plus intensément dans le substrat sableux que dans le mélange. Cela veut dire que dans le substrat sableux, la plante est beaucoup plus affectée par la contrainte de salinité que dans le mélange. En effet, l'analyse de la variance à deux critères de classification (Tableau 30), montre un effet dominant lié au substrat (60,30 %) par rapport à celui lié à la salinité (25,83 %).

Tableau 30 – Part des différents facteurs dans les variations globales de la hauteur des plants

Source de variation	Taux de variation, %	Signification
Salinité	25,83	p < 0,05
Substrat	60,30	p < 0,01
Résiduel	13,86	
CV = 12,93 %		

### b- Densité racinaire

Pour la densité racinaire, nous n'allons pas discuter les résultats pour chacun des deux stades de développement, étant donné que les données y sont similaires mais dans des proportions variables, évidemment à cause de l'état de croissance de la plante.

Pour les deux stades de développement, la densité racinaire (Fig.68) diminue suite à l'augmentation de la concentration saline. Les valeurs enregistrées dans le mélange, pour ce paramètre, sont plus élevées par rapport à celles obtenues dans le sable. Dans ce dernier substrat, les variations de la densité racinaire montrent des écarts avec le traitement témoin plus importants que dans le cas du mélange. Ce qui montre, que la réponse de la rhizosphère

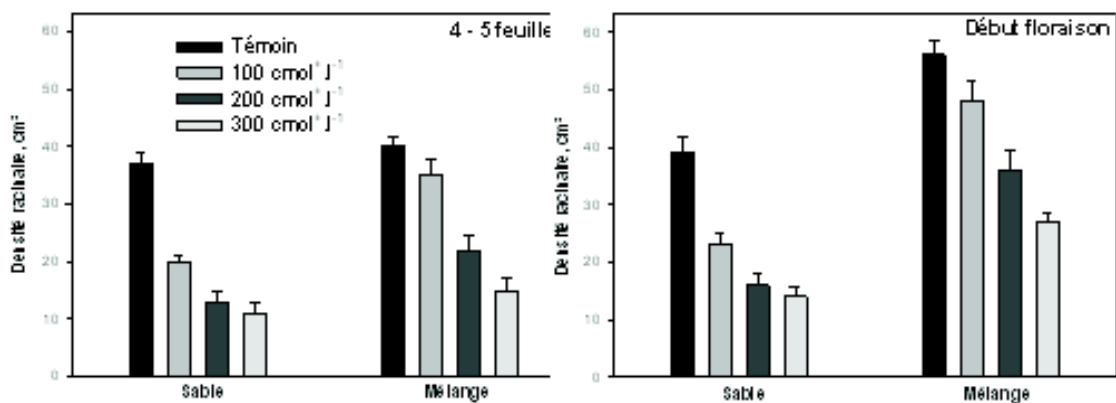


Fig. 67– Densité racinaire en cm<sup>2</sup> de la plante en fonction des substrats et de la concentration saline pour les deux stades de développement

à la contrainte saline s'effectue en fonction du substrat dans lequel elle se trouve. En effet, bien que l'analyse de la variance à deux critères de classification, montre une dominance de l'effet de la salinité (57,70 %), il n'en demeure pas moins que la part d'influence liée au substrat n'est pas des moindres (39,25 %).

Tableau 31 – Part des différents facteurs dans les variations globales de la densité racinaire

Source de variation	Taux de variation, %	Signification
Salinité	57,70	$p < 0,05$
Substrat	39,25	$p < 0,01$
Résiduel	3,05	
CV = 10,88 %		

### V.2.2.2 Discussions

La connaissance des variations du pH est importante pour le rôle que joue ce paramètre sur la croissance des plantes. En effet, le pH varie avec l'accroissement de la concentration saline pour les deux substrats et les deux stades de développement. Néanmoins, le fait que sa valeur soit comprise entre 6 et 8, n'affecte pas la nutrition de la culture si l'on se réfère à ce qui est rapporté par Lakhdari (1986), que cette espèce craint en général des pH inférieurs à 4,5 ou supérieurs à 8,5.

Les variations de la CE de l'extrait de pâte saturée, peuvent partiellement contribuer au stress de la culture par les modifications qu'elles entraînent sur la pression osmotique du milieu. En effet, tout accroissement de la CE se manifeste par une augmentation de la pression osmotique qui à son tour affecte la biodisponibilité des nutriments pour la plante (Satti et Yahyai, 1995). Ceci d'autant plus, que la gamme de variation de ce paramètres entre 4,5 et 6,2  $\text{dS.m}^{-1}$ , étant supérieure au seuil de 3,5  $\text{dS.m}^{-1}$  tolérable par la culture (Skiredj, 2005), montre que la plante est effectivement d'autant plus stressée que la concentration saline est plus grande.

Les variations de la teneur en eau de la plante, sous l'effet de l'accroissement de la concentration saline, expriment globalement, le mécanisme que déclenchent les glycophytes à maintenir, dans une certaine mesure, leur turgescence en milieu salé grâce à l'augmentation de leur concentration interne en certaines substances organiques assurant l'ajustement osmotique (Chrétien, 1992), comme les glucides (Jane, 1966 ; Binet, 1980 ; Bennabi, 2005) et les acides aminés (Delauney et Verma, 1995; Nanjo et al, 1999). D'autres travaux montrent, que la salinité entraîne un ralentissement de la croissance de la plante, puis un flétrissement et parfois même un dessèchement complet en cas de fortes concentrations salines (Dorota, 1997 ; Durand, 1973).

Les résultats de la taille et de la densité racinaire de la plante confirment les perturbations physiologiques jadis citées, sous l'effet de la contrainte de salinité/sodicité notamment pour les plantes installées dans le substrat sableux par rapport au mélange. Ces données indiquent certes, que la morphologie de la plante est d'autant plus affectée que la concentration saline est importante, mais elles expriment aussi, un effet favorable de la bentonite sur les propriétés d'hydratation du sable aux deux stades de développement.

Nous rappelons, que les résultats de la taille et de la densité racinaire des plants de la tomate représentent la moyenne des valeurs des trois blocs du dispositif expérimental. Parmi ces trois blocs, nous avons choisi celui dont les plants sont les plus représentatifs que nous avons photographié (Photos 7 et 8). Ce qui permet de montrer à une échelle différente, l'aspect morpho-racinaire de la plante, ayant suivi l'application du stress et permet aussi de faire exprimer la réponse de la culture à la contrainte de salinité et sodicité. Ceci est de nature, liée à une certaine forme d'adaptation physiologique de la plante, comme nous l'avons jadis évoqué par le maintien de sa turgescence en milieu salé sodique. Mais ce qui nous intéresse le plus, dans cette étude, c'est de faire figurer au premier plan, le

rôle du substrat dans cette forme d'adaptation de la culture aux contraintes abiotiques. C'est pourquoi, nous avons déterminé des paramètres aussi importants que le pH et la CE pour mettre en relief les propriétés édaphiques du milieu dans lequel la plante évolue. Les résultats, font apparaître, en général, un rôle essentiel de la bentonite, d'atténuation de l'effet de la salinité mais aussi et surtout de la sodicité, étant donné que c'est le sodium qui est responsable du blocage de la nutrition de la plante et de la toxicité du milieu. Il est bon de rappeler, qu'une forte sodicité au SAR de 24 correspondant à la concentration de  $300 \text{ cmol}^+ \cdot \text{l}^{-1}$ , est susceptible de mettre certaines cultures dans des conditions extrêmement sévères et donc de provoquer des contraintes non négligeables à leur fonctionnement physiologique. Ceci dépend des propriétés de tolérance à la sodicité du matériel végétal, mais dans tout les cas, si nous limitons son stress à une durée donnée et à des stades de son développement bien choisis (juvéniles), nous aborderons la question des effets de la contrainte étudiée avec beaucoup de pertinence. En effet, la réponse à un stress temporaire sur le plan physiologique, est beaucoup plus conséquente qu'une contrainte permanente qui est susceptible d'entraîner un flétrissement brutal de la plante.

Il est utile de rappeler que les seuils de tolérance à la salinité (CE) rapportés par la littérature pour les différentes spéculations agricoles, ne présentent qu'un caractère indicatif puisqu'elles sont obtenus dans des conditions standard de matériaux élaborés pour permettre, d'une part, une utilisation pratique qui n'est pas forcément valable dans des approches de recherche expérimentales et d'autre part, pour comparer les productivités agricoles obtenues entre cultures. C'est pourquoi, en discutant les variations des paramètres étudiés sous l'effet de la salinité, nous avons continuellement sous entendu l'effet de la sodicité vue que chaque solution utilisée présente un caractère salin (concentration saline) et un caractère sodique (SAR). Ils'agit donc, d'un paramètre de contrôle combiné de salinité et de sodicité des résultats

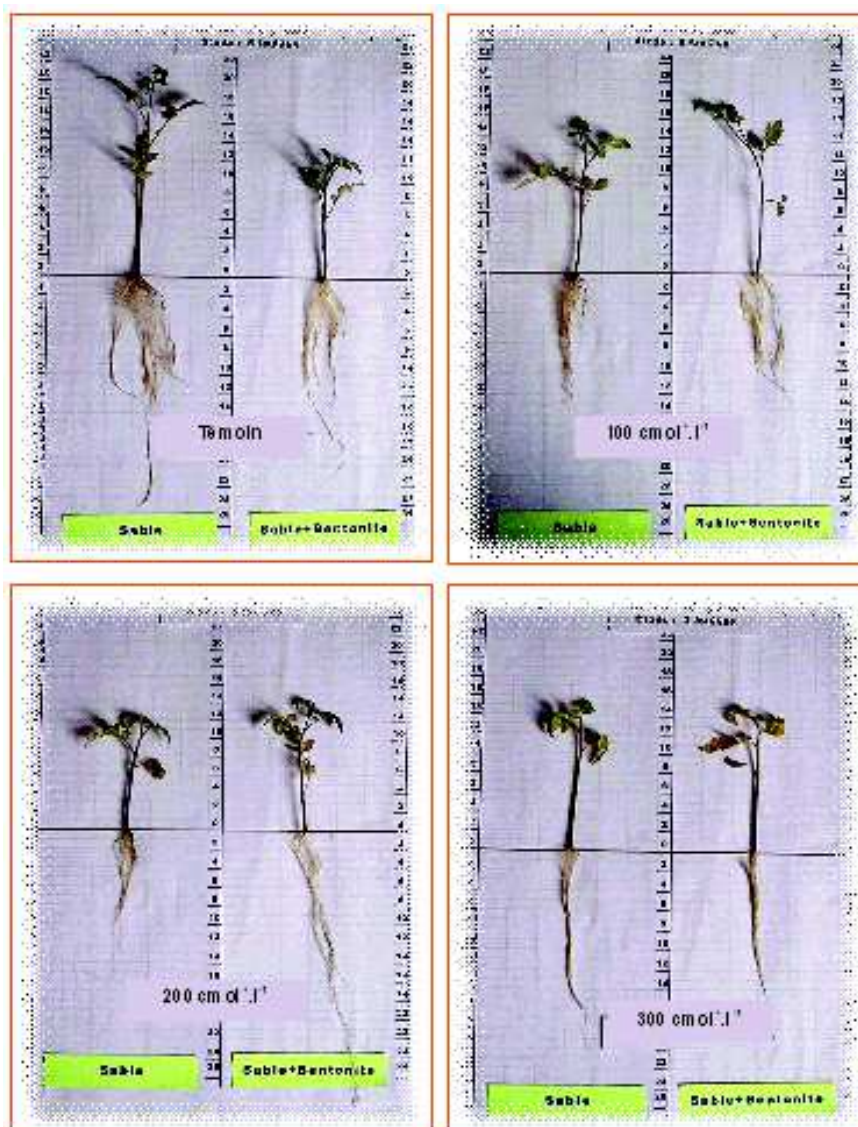


Photo 7 – Taille et densité des racines de la plante en fonction des substrats et de la concentration saline pour le stade de développement 4-5 feuilles.

discutés pour cette espèce végétale qui se présente comme un bio-indicateur remarquablement fiable pas le fait qu'elle confirme la plupart des résultats discutés dans les chapitres précédents sur les plans physique, minéralogique et hydrique.

La question de la tolérance de la culture au stress salin et sodique peut aussi être discutée d'un point de vue agronomique en considérant la part de diminution de la taille de la culture et de sa densité racinaire, sous l'effet de la concentration saline, qui ne doit pas excéder 50 % (Tableau 32), si l'on se réfère à Durand (1973) et plus tard Boulain (1978), qui rapportent que la baisse du rendement de la biomasse végétale à un seuil de 50 % est

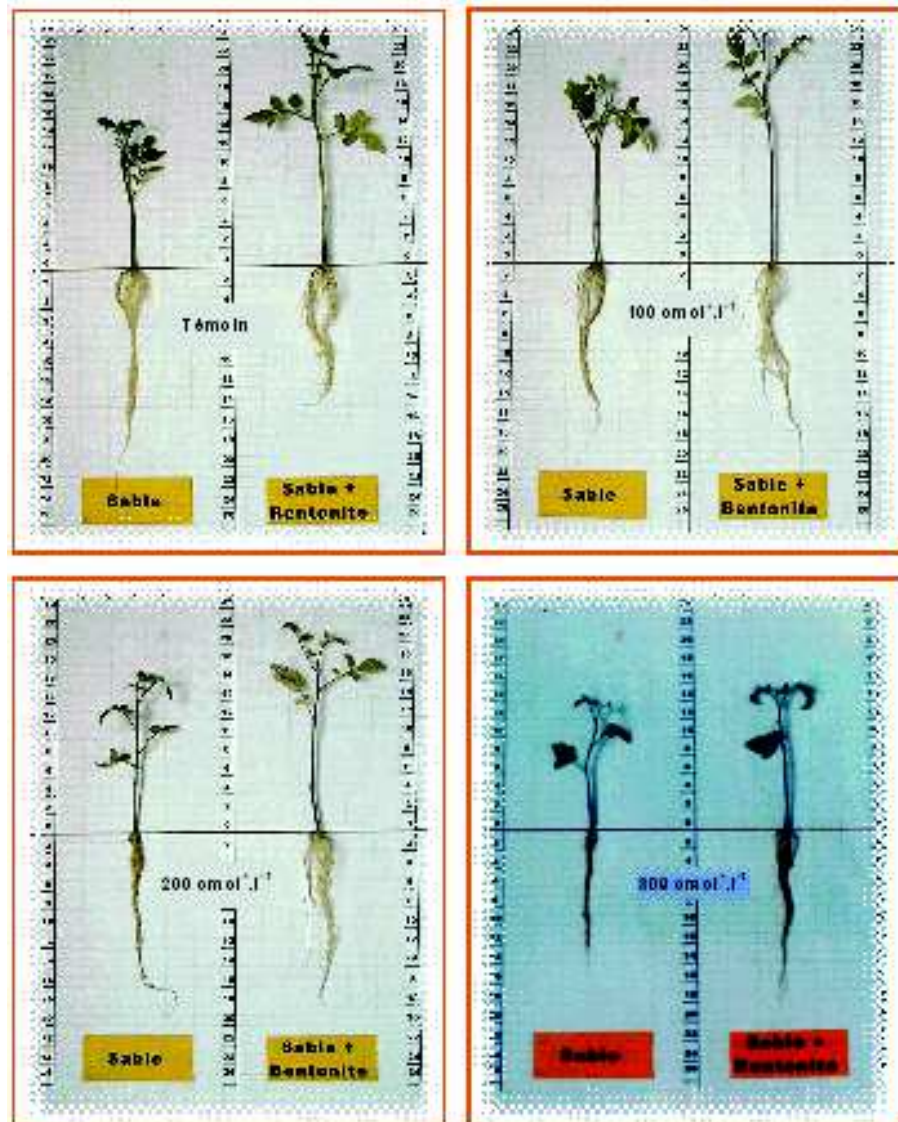


Photo 8 – Taille et densité des racines de la plante en fonction des substrats et de la concentration saline pour le stade de développement début floraison.

admise comme limite tolérable pour une culture en milieu salé. Ceci peut en effet, mettre en relief le rôle bio-indicateur de la plante vis-à-vis des deux substrats utilisés. Dans le substrat sableux (Tableau 32), la culture enregistre déjà des diminutions[8] importantes pour le traitement de  $100 \text{ cmol}^+ .\text{l}^{-1}$ . Ce qui n'est pas le cas pour le mélange, où la seule diminution de plus de 50 % est atteinte pour la densité racinaire à  $300 \text{ cmol}^+ .\text{l}^{-1}$ .

Il est important de remarquer que la densité racinaire est plus affectée par le stress salin que la hauteur des plants et peut donc constituer un indice pertinent pour la mise en évidence des effets de la salinité et de la sodicité sur le comportement des plantes.

L'obtention de variations positives (*augmentations*), concerne la hauteur des plants dans le substrat amendé (Tableau 32) et peut être expliqué par le fait que dans certains cas, une faible salinité peut conduire à des augmentations de croissance par rapport au témoin. En effet, Lehr (1984), a observé que la croissance du lin et de l'épinard est favorisée par la



Paramètre	Concentration saline, $\text{cmol}^+ \cdot \text{l}^{-1}$	4-5 feuilles		Début floraison	
		Sable	Mélange	Sable	Mélange
Hauteur des plants, cm	100	- 5,88	50,00	- 4,76	7,69
	200	- 23,53	33,33	- 19,05	- 15,38
	300	- 29,41	16,67	- 38,10	- 30,77
Densité racinaire, $\text{cm}^2$	100	- 45,95	- 12,50	- 41,03	- 14,29
	200	- 64,86	- 37,14	- 58,97	- 35,71
	300	- 70,27	- 31,82	- 64,10	- 51,79

Tableau 32 - Taux de variation de la teneur en eau et de la densité racinaire de la culture par rapport au témoin

présence de NaCl à faibles concentrations. Le même effet a été signalé par Chohan (1974) chez quatre cultures dont la tomate pour lesquelles la masse de matière sèche produite augmente en moyenne de 20 unités lorsque  $5 \text{ meq} \cdot \text{l}^{-1}$  de NaCl sont ajoutés à la solution témoin (Mizrahi, 1988). Par rapport à ces travaux, la moyenne des concentrations que nous avons utilisées ( $200 \text{ cmol}^+ \cdot \text{l}^{-1}$ ) pourrait paraître importante, il est néanmoins important, de différencier entre l'effet d'un stress et celui d'une irrigation continue. Il faut également prévoir l'association NaCl+CaCl<sub>2</sub> qui aboutit à une solution saline moins contraignante du fait du rôle antagoniste exercé par le Ca<sup>++</sup> sur le Na<sup>+</sup> en matière de stabilité des structures pariétales et membranaires (Wuytack et Gillet, 1978 ; Zekri, 1993). Il existe par ailleurs, une relation entre le niveau de tolérance d'une espèce et la teneur en calcium de ses tissus particulièrement racinaire (Bigot et al., 1983).

Les variations de la taille et de la densité racinaire dues à la salinité et la sodicité par rapport au témoin (Fig. 11), montrent que ces deux paramètres ne répondent pas de manière similaire à ces deux contraintes abiotiques. Dans le substrat sableux, la densité racinaire semble relativement plus affectée par le stress à  $300 \text{ cmol}^+ \cdot \text{l}^{-1}$  au premier stade et pour les trois concentrations salines au second stade. Dans le mélange, c'est la hauteur de la partie aérienne qui semble en être la plus affectée par rapport la densité racinaire. En effet, Lakhdari (1986), rapporte qu'à une concentration de 100 millimoles de NaCl, la croissance de la racine n'est pas affectée et sa masse de substance sèche reste équivalente à celle des racines témoins, alors que celle de la tige décroît de 50 %. Ce phénomène est signalé par Bernstein (1975) qui indique que la réduction de la taille d'une plante sous l'effet de la salinité n'est pas homogène pour tous les organes et très souvent la salinité réduit davantage la croissance des parties aériennes que celles des racines. En étudiant la variété d'orge *Beccher*, tolérante au sel, Delane et al. (1979) expliquent ce phénomène par le fait que la présence de NaCl dans la plante entraîne une réduction du potentiel osmotique au niveau des zones de croissance active des racines.

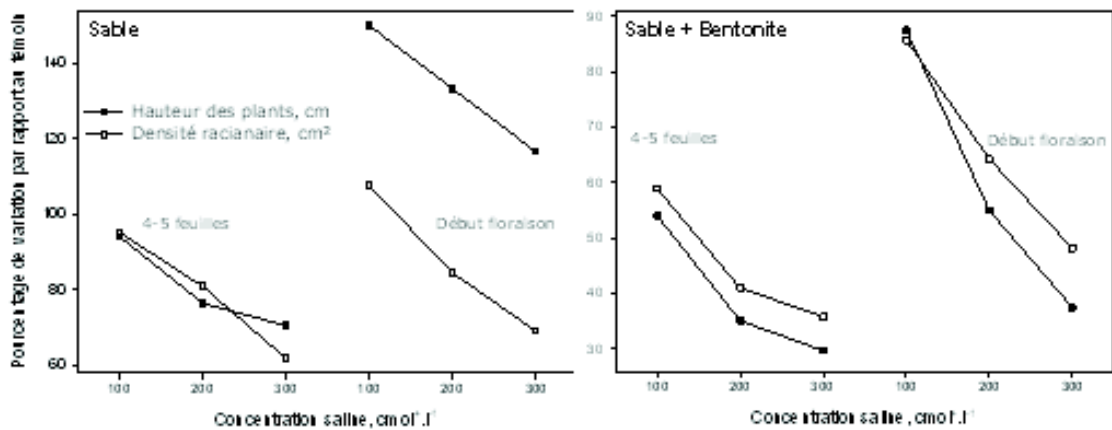


Fig. 68- Pourcentage de variation de la hauteur des plants et de la densité racinaire en fonction des substrats et de la concentration saline pour les deux stades de développement

Dans ces études, nous avons relevé que l'effet du substrat n'est pas considéré et est pris comme support standard au matériel végétal. Mais dès lors que la question du substrat est prise en compte (Fig.69), une sensibilité plus marquée se manifeste pour le stress salin-sodique au premier stade 4-5 feuilles dans les deux substrats, ce qui concorde avec les données de la littérature (Adams et Holder, 1992; Mougou et al., 1993 ; Hamdy et al., 1997 ; Katerji et al., 2000). Néanmoins, nous relevons au second stade, une différence pertinente de réponse de la culture au stress entre les deux substrats. Ceci est de nature lié au fait que le sol est le siège des phénomènes hydrodynamiques et physiologiques qui s'y manifestent vis-à-vis de la plante, surtout que l'argile joue un rôle très actif dans le déroulement de tels phénomènes. Par ailleurs, il est aisé de remarquer que, tout facteur étant par ailleurs égal, la seule variation du substrat, entraîne des formes différentes d'adaptation de la plante à la contrainte saline-sodique (photos 7 et 8). Ces observations s'apparentent bien avec les paramètres physiques et morphologiques discutées précédemment et démontrent le rôle important que peut jouer l'addition de bentonite de Maghnia dans les propriétés physiques des sols sableux et dans le comportement de la tomate.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cherché à vérifier à travers le comportement d'un matériel végétal (la tomate), les résultats discutés dans les chapitres précédents qui concernent l'effet de la bentonite sur les propriétés d'un sol sableux. En tant que bio-indicateur cette espèce s'avère doublement intéressante. D'une part, elle manifeste une réponse à la contrainte de salinité et sodicité largement perceptible en rapport avec les paramètres de stress choisis. D'autre part, c'est cette même contrainte de salinité et de sodicité qui est très souvent à l'origine de la baisse de rendement de cette espèce. Ce qui permet, vu son importance économique, de contribuer à comprendre, les paramètres déterminants dans sa production en zones arides, semi arides et littorales particulièrement en ce qui concerne l'utilisation de la technique d'amendement argileux pour l'amélioration des propriétés des sols sableux.

L'un des résultats importants de cette étude dans son premier volet, est la pertinence avec laquelle la bentonite de Maghnia 1 atténue les effets de la salinité et de la sodicité, observés dans la partie racinaire de l'espèce étudiée, par rapport à la bentonite de Mostaganem 14. Ce qui permet de la désigner comme la forme de bentonite la plus favorable à une optimisation des apports d'argile pour l'amélioration des sols sableux.

Une autre dimension importante des résultats, concerne le degré d'influence du substrat par rapport à la salinité sur les variations des paramètres mesurés qu'ils soient édaphiques (pH et CE) ou morphologiques (Teneur en eau, hauteur des plants et densité racinaire de la plante). En effet, la part d'influence de ces derniers paramètres sur les variations globales varie entre 39 et 65 % pour le substrat alors qu'elle ne varie qu'entre 26 et 58 % pour la salinité. Ce qui montre que l'effet de l'ajout de bentonite de Maghnia au sable contrôle une grande partie des propriétés dans le mélange qui se manifestent à travers les caractéristiques morphologiques et racinaires de la tomate en tant que bio-indicateur. C'est pourquoi, cette dernière répond différemment au stress salin selon qu'elle évolue dans le sable ou dans le mélange avec la bentonite. Dans le mélange, avec la dose de 10 % de bentonite ajoutée au sable, les effets de la salinité et de la sodicité sont atténués au point où leurs répercussions sont très apparentes à travers les données morphologique et racinaire de la culture. Il est possible de prévoir que cette argile envisagée pour la bonification des sols sableux dans les régions arides, semi arides et littorales permettrait d'irriguer l'espèce végétale étudiée avec une eau saline dans la limite d'une diminution du rendement raisonnable, étant donné que les stades étudiés sont relativement les plus sensibles dans le cycle de la plante. Cet aspect, ouvre une voie de recherche sur l'éventuelle réutilisation d'une eau d'irrigation par le seul fait d'une bentonisation du sol sableux. Ce qui nécessitera l'expérimentation de ces mêmes conditions d'étude, mais avec une irrigation continue à tout le cycle de la culture et moyennant plusieurs concentrations. Ceci, afin de déterminer les éventuels gains en performances d'adaptation de la culture à la salinité et la sodicité entraînés par l'effet de la bentonite par rapport au niveau de sa tolérance initial.

## Chapitre VI Discussions et conclusions

Dans ce travail, nous avons projeté de comprendre le comportement de l'argile de Maghnia en tant qu'amendement minéral pour des sols essentiellement sableux soumis aux contraintes abiotiques de salinité et sodicité. Cette étude soulève plusieurs questions dont en premier lieu l'importance de la texture du sable dans le mélange et le rôle de l'argile elle-même en fonction de sa nature et de celle des constituants associés. En second lieu apparaît les effets respectifs de la salinité et de la sodicité sur les propriétés des mélanges argile sable.

La caractérisation des sables utilisés dans cette étude, par le biais d'observations morphoscopiques et morphométriques, a montré leur origine éolienne. En effet, le plateau de Mostaganem qui s'étend à plus de 78100 ha, se caractérise par une forte activité éolienne dominée par des vents Nord-Ouest qui peuvent durer plusieurs mois dans l'année, à l'origine du transport des sables (Benest, 1985 ; Larid, 1993 ; **Atroune, 1993**). Ce plateau en dégradation continue n'a bénéficié que de très peu d'étude au moment même où il demeure très convoité. De ce fait, et additionnellement à l'effet érosif, il est soumis à une concentration urbaine et à diverses activités économiques (présence de ports de transport de marchandises et de pêche) qui menacent autant ses ressources que ses équilibres écologiques fondamentaux (Lorne, 1959 ; Anonyme, 1997).

Nous rappelons que les échantillons de sables étudiés sont globalement représentatifs des sols de ce plateau et montrent à quel degré de vulnérabilité, ces sols sont soumis à la dégradation physique par érosion (Le Ribault, 1980 ; Atroune, 1993). Ceci du fait de leur faible rétention en eau qui ne peut assurer un couvert végétal permanent comme protecteur. Il faut noter que la dégradation des sols du plateau s'est manifestée fortement à la suite d'une décision politico-économique d'arrachage de la vigne survenue en 1987, sous les motifs de sa vétusté et son orientation vinicole. Depuis, la cadence spectaculaire à laquelle a lieu la dégradation de ces sols apporte, de fait, une dimension largement importante à toute étude d'amélioration des propriétés physiques des sols sableux du plateau. Il est tout aussi important de remarquer que les résultats de pareilles études sont extrapolables, en tenant compte des spécificités locales, aux sols sableux des zones arides et semi arides affectés eux mêmes par des contraintes similaires d'aridité et d'érosion éolienne (Abdely et al., 1997 ; Blackwell et al., 1990 ; Benmohammadi et al., 2000 ; Hamdi-Aïssa et al., 2004).

La texture des sables acquiert donc une grande importance pour deux raisons : d'une part sa grande vulnérabilité aux agents de dégradation physique et d'autre part son rôle non négligeable dans les propriétés du mélange avec l'argile. Ce dernier rôle se manifeste particulièrement en conditions de contraintes abiotiques de salinité et de sodicité qui caractérisent les régions arides et semi arides d'Algérie mais aussi les zones littorales qui sont de plus en plus menacées du fait de la grande concentration urbaine et les pressions qu'elle engendre sur le milieu. La qualité de l'eau d'irrigation est également un facteur de salinisation de ces zones qui en moyenne peut atteindre jusqu'à  $11,3 \text{ g.l}^{-1}$  de sels dans la seule région littorale Ouest du pays (Anonyme, 1997).

L'une des remarques intéressantes à mettre en discussions dans ce chapitre est qu'autant le rôle de l'argile est déterminant dans les propriétés du mélange, autant le sable

requiert lui aussi un caractère important à ne pas sous-estimer. En effet, l'exploitation de nos résultats montre que l'ajout de l'argile étudiée : la bentonite de Maghnia augmente de manière appréciable la rétention en eau du mélange dans la gamme de pF comprise entre 2,5 et 4,2 propre à la réserve d'eau utilisable par les plantes. Ceci concorde avec les résultats d'autres travaux (Bousnina et Mhiri, 1997 ; Benkhalifa et Daoud, 1998 ; Halilat et Tessier, 2006) et constitue une première réponse importante à la protection des sols sableux par cette méthode traditionnelle d'amendement. A priori, une comparaison sur l'ampleur de l'effet bénéfique de cette bentonite sur la rétention en eau des sols sableux par rapport aux autres échantillons de la même argile utilisés dans les études antérieures semble difficile compte tenu du rôle que joue le sable dans les propriétés d'hydratation du mélange et dont la texture elle-même varie d'une étude à une autre. En effet, la comparaison des deux sables que nous avons étudiés avec celui utilisé par Halilat (1998), de textures et de coefficients d'uniformité différents a montré que le caractère grossier et l'uniformité étalée sont deux facteurs favorables à une importante atténuation des effets de la sodicité sur les propriétés physiques du substrat. Ainsi la conductivité hydraulique saturée, admise comme indicateur déterminant des effets de la sodicité sur l'état de floculation du mélange, n'enregistre pas de chutes importantes même à des seuils du SAR de 30. Cela représente en soit, une donnée pertinente dans cette étude qui fait qu'en conditions de salinité et de sodicité, un sable grossier dans le mélange est beaucoup plus bénéfique aux propriétés édaphiques et à l'absorption hydrique de la plante qu'un sable fin. Ce qui veut dire que même la dose optimale de bentonite à apporter au sol sableux pour sa bonification est sujette à la texture initiale du sable autant qu'elle l'est pour le type d'argile.

Le fait d'avoir adopté deux échelles d'observation pour l'étude du comportement des mélanges sable-bentonite en conditions de contraintes abiotique de salinité et de sodicité est important dans la mesure où la première échelle *microscopique* nous a permis de caractériser finement les deux matériaux que constitue le mélange : le *sable* et la *bentonite*. Cette approche a permis de montrer que les propriétés de la bentonite varient sensiblement en fonction des conditions de son prélèvement au sein même d'un seul gisement. Dans ce cas, on ne peut désigner une argile par le seul nom du gisement d'où elle provient pour montrer ses effets dans le cadre de travaux de recherche, mais par ses caractéristiques minéralogiques et chimiques qui nécessitent sa fine caractérisation. Ce qui veut dire qu'extrapoler les résultats d'un cas à un autre, nécessite la re-caractérisation de tout nouvel prélèvement d'argile fut-il au sein même d'un gisement. L'importance de la caractérisation a été tout aussi remarquée sur les échantillons de sable que nous avons utilisés. L'échelle d'étude *microscopique*, nous a permis sur le plan *macroscopique*, seconde échelle d'observation, de faire exprimer significativement la part d'influence de chacun des deux matériaux originels sur le comportement du mélange vis-à-vis des contraintes de salinité et de sodicité. Une autre dimension de l'étude réside dans les résultats du comportement morphologique et racinaire d'un *bioindicateur* soumis aux mêmes conditions expérimentales. Cette dernière constitue une interface précieuse entre les données propres aux mélanges sable-bentonite et celles propres à la culture comme aboutissement des effets engendrés par les rôles relatifs de l'argile et du sable sur les propriétés du mélange siège de la croissance et du développement de l'espèce étudiée.

Pour l'argile, c'est l'effet de sa nature dans les propriétés du mélange qui paraît important dans la mesure où les caractéristiques d'une smectite de gisement comparées à celles des sols peuvent sans doute être reliées à la valeur de la charge électrique superficielle et à sa localisation (Ben Rhaiem et al., 1987, Laribi et al., 2005). Les travaux de la littérature démontrent que les argiles de gisement issu de l'altération d'origine volcanique sont très sensibles à la sodicité et que cela conduit à leur dispersion. Le meilleur moyen

d'utiliser ce type d'argile, en vue de maintenir une conductivité hydraulique suffisante à la limitation des risques de colmatage liés aux effets de la sodicité du substrat, est d'optimiser le choix de la dose à utiliser. Cette optimisation doit être réfléchiée en fonction de la taille et de l'étalement granulométrique du sable ainsi que la salinité de l'eau d'irrigation et son degré d'agressivité sodique (Mamedov, et *al.*, 2001 ; Keren et Ben-Hur, 2003). Nous rappelons que la qualité des eaux d'irrigation n'est pas des meilleures dans les zones arides et semi-arides d'Algérie. L'exemple de la région d'Ouargla (Sud-Est d'Algérie), où le SAR variant en moyenne de 2,3 à 32 entraîne une salinisation par irrigation de 3 à 5 fois celle de l'eau d'irrigation pour l'horizon de surface (Daoud et Halitim, 1994). Dans ce cas, la dose d'argile à adopter, doit être telle que la sodicité n'entraîne pas de baisse significative de la CH. Ceci peut être interprété comme un gonflement limité de l'argile dans la matrice du mélange de sorte que la continuité des pores entre les grains de sables ne soit pas colmatée par les colloïdes argileux. Ce qui peut être aussi le rôle de la salinité sur la porosité à l'instar de celui de la sodicité qui permet au gonflement de l'argile de s'exprimer dans l'espace poral délimité par les grains de sable. Ces considérations sont confirmées par d'autres travaux qui montrent que la solution saline peut faire varier d'un facteur 3 le gonflement de l'argile à un potentiel de l'eau proche de la saturation en eau (Tessier, 1984 ; Jayawardane et Greacen, 1987 et Chaudhari, 2001 ).

Les autres facteurs qui influencent les propriétés de gonflement des argiles sont leur pureté, leur type minéralogique et la présence de substances associées tels que les sels ou les carbonates (McIntyre et *al.*, 1979 ; Sally et David, 2004). L'argile de Maghnia avec une teneur en Ca échangeable  $>32 \text{ cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$  et un rapport Na/CEC=29 %, semble saturée avec du calcium. Ceci permet de limiter son gonflement et il faut que le SAR de l'eau d'irrigation atteigne le seuil de 45 pour que la CHs des mélanges s'approche de l'état d'imperméabilité. Il faut, dans ce cas, que le sodium soit présent dans la solution du sol avec une proportion assez élevée, pour qu'il y fasse l'objet d'un échange significatif. La salinité développe un effet contraire à celui de la sodicité par le fait qu'elle tend à limiter le volume d'argile au sein de la matrice sableuse. Il en résulte que la porosité d'assemblage des grains de sables demeure incomplètement remplie par l'argile assurant ainsi une certaine conductivité hydraulique saturée. Il est à noter que les seuils de salinité de  $1000 \text{ cmol}^+ \cdot \text{l}^{-1}$  et de sodicité de 45 utilisés dans cette étude, représentent des conditions d'aridité extrêmement sévères (Benkhelifa et *al.*, 2007). Ils démontrent que l'utilisation de cette bentonite est très appropriée pour l'amélioration physique et hydrique des sols sableux et l'atténuation des effets de dégradation de la structure par les contraintes abiotiques de salinité et sodicité en milieux arides et semi-arides. Cette argile semble préférable à celle de Mostaganem étudiée par Halilat (1998), car les effets de la sodicité et de la salinité sont beaucoup plus tamponnés.

Par ailleurs, l'observation des caractéristiques morphologiques et racinaires d'un bio-indicateur, en l'occurrence la tomate, cultivée dans les substrats étudiés et soumis aux mêmes conditions expérimentales, a permis de corroborer les résultats obtenus sur le plan édaphique et confirme l'importance de ce type d'argile -la bentonite de Maghnia-, non seulement dans l'amélioration des propriétés physiques des sols sableux mais aussi dans l'atténuation des effets de la salinité et de la sodicité en zones arides, semi arides et littorales. C'est pourquoi, nous avons relevé qu'en moyenne, 52 et 42 % des variations dans les caractéristiques morphologiques et racinaires de la culture étaient dues respectivement à l'influence du substrat et de la salinité. Ce qui permet de déduire que la plante a bénéficié beaucoup plus de l'amélioration apportée au sol sableux qu'elle n'a été stressée par la salinité et la sodicité (Munns et Termaat , 1986). A ce niveau, il faut noter que ces résultats

concernent des stades de développement extrêmement déterminants dans le cycle de la culture et connus pour leur entière sensibilité aux contraintes abiotiques de salinité et de sodicité. Ce qui leur donne, dans une certaine mesure, l'ampleur d'une validité à tout le cycle de la plante (Katerji, 2001). D'un autre côté, les paramètres de mesure morphologiques choisis et en particulier la densité racinaire ont été ciblés pour leur fort degré d'appréhension des effets des contraintes de salinité et de sodicité sur la plante (Slama<sup>1</sup>, 1986).

Ce travail constitue, par ailleurs, un cadre pour l'étude au champ d'amendements à base d'argile. Ce type d'usage apparaît largement réservé à des pratiques locales, notamment dans le cadre de productions maraîchères ou familiales en vue de surmonter une éventuelle contrainte liée au coût. Il peut également s'étendre aux plantations arboricoles. C'est pourquoi il est important de noter que cette étude ne vise nullement l'utilisation systématique de la bentonite de Maghnia pour la bonification des sols sableux en milieux arides, semi arides et littoraux, mais elle propose de mettre en œuvre les bases d'optimisation de son utilisation à l'échelle locale, quand cela est justifié, en ajustant au mieux la dose à utiliser en fonction de la granulométrie du sable et de la nature de l'eau d'irrigation (concentration en sels solubles et SAR). Dans ce cas, bien qu'un sable grossier, semble plus facile à gérer qu'un sable fin, cela ne veut pas dire que cette technique est à écarter mais elle devra, seulement, faire l'objet d'attention particulière dans la conduite de l'irrigation. A ce niveau, il faut rappeler que la nature du sable est un paramètre de l'équation de l'amendement non maniable. Si éventuellement, sa texture n'est pas favorable à une bonne atténuation des effets de la sodicité sur les propriétés physiques du mélange, il serait nécessaire de prendre des mesures spécifiques à la situation. L'une de ces mesures est le choix de la bentonite. En effet, l'origine de la bentonite (minéralogie) est importante en matière d'optimisation des propriétés de gonflement et d'hydratation du mélange. L'enjeu de mise en œuvre d'une faible dose potentielle en bentonite requiert aussi une grande influence sur le coût de l'amendement. Une autre mesure peut consister en l'utilisation de cette argile pour la plantation d'arbres en l'enfouissant à la base de leurs systèmes racinaires. Cette pratique, plus accessible financièrement, peut constituer une alternative pour l'arboriculture quasiment absente en zones arides et semi-arides et même parfois littorales d'Algérie.

Ces dernières mesures sont, par ailleurs, d'une grande importance eu égard à la protection contre les agents de dégradation (érosion, salinisation), qu'elles peuvent assurer à de grandes étendues de sols sableux des zones arides, semi arides et littorales. Le plateau de Mostaganem constitue un exemple parmi beaucoup d'autres régions soumises à la dégradation. Nous pensons que ces mesures peuvent constituer des pratiques qu'il importe d'injecter ou de réhabiliter dans les mœurs agricoles des microrégions des zones concernées. Cette démarche est susceptible de concrétiser à moyen et long terme la protection de ces aires et de leurs ressources en sols et en eaux.

Le fait d'utiliser l'argile sous sa forme brute, pour des raisons de coût, est en lui-même un avantage à cause de sa forme agrégée qui doit avoir un rôle déterminant sur le plan de sa migration. En règle générale, il est admis que le renouvellement de l'apport en bentonite n'est envisageable qu'au bout de dix ans, ce qui est largement suffisant pour amortir l'amendement si l'on se réfère aux données de 10 à 40% d'augmentation des rendements à l'hectare en fonction de la culture (Benkhelifa, 1997) et de 47% de diminution des pertes en eau par percolation en cas d'irrigation à la raie (Benkhelifa et al., 2007), obtenues avec une dose de 10 % de bentonite par rapport au témoin sableux. Dans ce cas de figure, une estimation sommaire du gain engendré par l'amendement en bentonite se situe en moyenne à 30%.

Une autre expérience menée en parallèle sur des colonnes comportant le mélange d'un sable provenant de la cuvette de Ouargla initialement salé à des doses de 0, 5, 10 et 15 % de bentonite était soumis à plusieurs irrigations à l'aide d'une eau de CE nulle. Cette étude a montré qu'au bout de la seconde irrigation, 75% en moyenne du sodium soluble est évacuée vers le tiers inférieur de la colonne considérée comme étant en dehors de la zone racinaire de la plante (Benkhelifa et *al.*, 2003). Ces résultats trouvent leur importance dans l'équilibre qui existe entre la part de sodium échangeable fixée dans le complexe échangeur et celle présente sous forme soluble dans la solution du sol (Boulaine, 1978 ; Chamayou et Legros, 1989). Cela veut dire, que même au seuil de 15 % de bentonite incorporée au sable, la rhizosphère se débarrasse facilement du sodium et donc de son effet néfaste sur les propriétés du sol et de la plante dès les premiers arrosages avec une eau saine. Dans les conditions réelles des climats arides et semi arides, la CE de l'eau d'irrigation étant loin d'être nulle, nécessiterait une utilisation de cette eau avec des doses supplémentaires de lessivage pour faire évacuer la part de son sodium soluble.

D'un autre côté, il est raisonnable de noter qu'autant les résultats de cette étude sont importants pour l'amélioration des sols sableux, autant ils peuvent grandement contribuer à l'amélioration des sols hyper-argileux par l'addition de sable particulièrement en conditions sodiques.

Cette bentonite peut également constituer un moyen de fixation des dunes dans la mesure où il importe de définir le moyen avec lequel il est possible de l'épandre à grande échelle, la dose optimale à adopter et la forme sous laquelle elle doit être appliquée. Dans ce cas, une forme diluée dans l'eau peut être intéressante sur le plan environnemental étant donné que certains pays du Golf ont utilisé des produits pétrochimiques pour la fixation des dunes à l'échelle régionale (Meunier et Rognon, 2000). Cette pratique a suscité de vives critiques principalement pour son caractère polluant à base d'hydrocarbure, c'est pourquoi il est utile d'étudier l'utilisation de la bentonite comme alternative intéressante à cette méthode sur le plan écologique.



## Références Bibliographiques

- Abdelly C., Sleimi N., Soltani A., Haji M. and Grignon C., 1997 - Improvement perspectives of pastures in strongly salted zones. International Conference on «Water management, salinity and pollution control towards sustainable irrigation in the Mediterranean region. Proceeding of Special session : Salinity problems and halophyte use,: 99-118. Bari, Italy.
- Abrahams A.D. and Parsons A.J., 1994 - Geomorphology of desert environments. New York: Chapman & Hall. 674 p.
- Adams P. and Holder R., 1992 - Effects of humidity, Ca and salinity on the accumulation of dry matter and Ca by the leaves and fruit of tomato (*Lycopersicon esculentum*), J. Hortic. Sci, n° 67, :137-142.
- Ahuja L. R. and Williams R. D. 1991 - Scaling water characteristic and hydraulic conductivity based on Gregson-Hector-McGowan approach. Soil Sci. Soc. Am. J. Vol.55, n°2, :308-319.USA.
- Ahuja L.R., Johnsen K.E. and Rojas K.W., 1999 - Water and chemical transport in soil matrix and macropores, in Root Zone Water Quality Model-Modeling management effects on water quality and crop production, ed Ahuja L.R. Rojas K.W., Hanson J.D., Shaffer J.J. & Ma L. Water Resources Publications LLC, Highlands Ranch, CO., : 13-50.
- Allison L. E., Bernstein L., Bower C. A., Brown J.W., Fireman M., Hatcher J.T., Hayward H. E., Pearson G.A., Reeve R.C., Richards L. A. and Wilcox L.V., 1954 - Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Agric. Handb. 60. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC. 160p.
- Amitom, 1998 - Report of Mediterranean International Association of the Processing Tomato. Association des organisations professionnelles des transformateurs de tomates dans le pourtour méditerranéen [05/08/2002], <http://www.amitom.com/cadref.htm>
- Anonyme, 1997 - Situation de l'environnement en Algérie. Rapport de la 3<sup>eme</sup> et 4<sup>eme</sup> sessions du Conseil National Economique et Social (CNES), tenues les 22 et 23 juillet 1997 à Alger. 79p.
- Anonyme, 2004 - La tomate destinée à la transformation. Bulletin de l'Onagri, n°81, 4p. Tunisie, [en ligne], web si at : <http://www.onagri.nat.tn/Bulletin/2004/Bulletin81.pdf>
- Archana S., Sharmistha G., Sukta D., 2002 - Administration of garlic and tomato can protect from carcinogen induced clastogenicity. Nutrition Research, 22, :859–866.
- Argod F., 2001 - La vigne et le vin dans le De re rustica de Columelle. Actes du Colloque pluridisciplinaire : Le vin dans ses œuvres, 17-19 mai 2001, : 17-23. Libourne-Montagne.

- Asma A. A., Anwar S. A., Waleed K. A., Nabil A. E. and Mahmoud A. R., 2002 - Desertification in the Arab Region: analysis of current status and trends. *Journal of Arid Environments*, n° 51, : 521-545
- Assouline S., Tessier D. and Bruand A., 1998 - A conceptual model of the soil water retention curve. *Water Resources Research*, Vol. 34 (2), : 1023-1030
- Atroune F., 1993** - Etude de la sédimentation sur le plateau continental de Mostaganem (Algérie occidentale) : rôle de l'oued Chélif et des organismes carbonatés. Magister USTHB Alger, 143p.
- Aubert G., 1978 - Méthodes d'analyses des sols. CRDP. Marseille, 191p.
- Ayers, R.S. and Tanji K., 1981 - An application from Ayers and Westcot's 1985 "Use of treated municipal wastewaters for irrigation." *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29 Rev. 1*. Originally published as an ASCE 1981 Water Forum Conference Proceedings. In : Nikos J. Warrence, Krista E. Pearson, and James Bauder W., 2003 -The Basics of Salinity and Sodicyty Effects on Soil Physical Properties. Adapted by Krista E. Pearson [en ligne], (Last Modified 10/06/2007). Web site at : [http://waterquality.montana.edu/docs/methane/basics\\_highlight.shtml](http://waterquality.montana.edu/docs/methane/basics_highlight.shtml)
- Balba A. M., 1995 - Management of problem soils in arid ecosystems. CRC Press. 250 p.
- Bamouh A., 1999 - La tomate industrielle sous serre. *Bulletin du P.N.T.T.A n° 57*. Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Maroc, 4p. Site web : <http://www.vulgarisation.net/bul57.htm>
- Bauder J. W. and Brock T.A., 2001 - Irrigation water quality, soil amendment, and crop effects on sodium leaching." *Arid Land Research and Management*, 15:101-113.
- Belaroui L.S., Millet J.M.M. and Bengueddach A., 2004 - Characterization of lalithe, a new bentonite-type Algerian clay, for intercalation and catalysts preparation. *Catalysis Today*, 89, : 279–286.
- Belkhodja M., 1996 - Action de la salinité sur le comportement physiologique de marqueurs molculaires chez la fève (*vicia faba*). Thèse Doct. es Sci. biologiques, Univ. d'Oran, 255p.
- Benahmed H., Zid E., El Gazzah M. and Grignon C., 1996 - Croissance et accumulation ionique chez *Atriplex halimus* L., *Cahiers Agricul*, 5, :367-372.
- Benest M., 1985 - Évolution de la plate-forme de l'Ouest Algérien et du Nord-Est marocain au cours du Jurassique supérieur et au début du Crétacé : stratigraphie, milieux de dépôt et dynamique sédimentaire. Université Claude Bernard, Lyon. Fasc. 2, 581 p.
- Benkhelifa M. et Daoud Y., 1998 - Influence de la bentonite sur les propriétés physiques d'un sol sableux. *Annales de l'INA-El Harrach*, Vol. 19, n°1 et 2, :18-29
- Benkhelifa M., 1997 - Influence de la bentonite sur les caractéristiques physiques, hydriques et mécaniques d'un sol sableux du plateau de Mostaganem. Thèse de Magister. INA d'El Harrach. Alger, 114p.
- Benkhelifa M., Arbaoui M., Ould Abdi M. and Belkhodja M., 2003 – Leaching of Soluble Sodium in Sandy Soil Amended With Bentonite. *Egypt. J. Appl. Sci*, 18 (3), :297-307.

- Benkhelifa M., Belkhodja M., Daoud Y. et Tessier D., 2007 - Effets of Maghnian Bentonite on Physical Properties of Sandy Soils Under Semi-Arid Mediterranean Climate. Pak. J. Biol. Sci., under press
- Benkhelifa M., Daoud Y., Belkhodja M. et Tessier D., 2007 - Efficiency of Furrow Irrigation on Sandy Soil Amended with Bentonite in Arid and Semi Arid Region. Options Méditerranéennes, Sér.B, 56 (1), :439-451.
- Benmohammadi A., Benmohammadi L.; Ballais J. L., Riser J., 2000 - Analyse des inter-relations anthropiques et naturelles : leur impact sur la recrudescence des phénomènes d'ensablement et de désertification au sud-est du Maroc (vallée de Drâa et vallée de Ziz).Sécheresse. Vol11, n°4, 297-308.
- Bennabi F., 2005 - Métabolismes glucidique et protéique chez *Atriplex halimus* L. stressée à la salinité. Thèse de Magister Université d'Oran, 50 p.
- Ben Rhaiem H., C.H. Pons and D. Tessier, 1987 - Factors affecting the micro-structure of smectites. Role of cation and history of applied stresses. Special Issue Proc. Int. Clay Conf. Denver, Clays and Clay Minerals, The Clay Minerals Society, : 292-297.
- Bensallah M., Benest M. et Truc G., 1987 - La couverture détritique continentale et la hamada des hautes plaines de l'ouest de l'Algérie. Datation. Synchronisation avec la phase tectonique majeure du Tortonien dans le domaine du Tell. Comptes rendus Académie Sciences Paris, 307 (série 2), : 979-983.
- Bental, 2002 - Projet de développement de l'exploitation du gisement d'argiles bentonitiques de Mzila, Wilaya de Mostaganem, Algérie. Documentation BENTAL. Editions EIRéda. 20 p.
- Benyahia H., Ait Haddou Mouloud M., Jrifi A. et Lamsetef Y., 2004 - Effet de la salinité de l'eau d'irrigation sur la colonisation des racines de porte-greffes d'agrumes par *Phytophthora parasitica*. Fruits, vol. 59, : 101-108
- Bernstein L., 1975 - Effects of salinity and sodicity on plant growth. Ann Rev.of Phytopathol. 13, :295-312. NA.
- 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 - Functional analysis of AtHKT1 in *Arabidopsis* shows that Na<sup>+</sup> recirculation by the phloem is crucial for salt tolerance. Embo Journal, 22, :2004-2014.
- Bertrand R., N'Diaye K. M. and Keita B., 1994 - L'acalinisation /sodisation, un danger pour les périmètres irrigués sahéliens. Sécheresse, Vol.5, n°3, :161-171.
- Bigot J., Le Saos J. et Binet P., 1983 - Effets du NaCl sur la composition cationique de quelques fractions subcellulaires des racines de Haricot et de *Cochlearia anglica*. Physiol. Vég. , 21 (1), :3-13.
- Binet P., 1980 - La salinité. Phytotron-Gif sur Yvette, , 14p.
- Bisson J. et Callot Y., 1990 - Les hommes et la sécheresse autour du grand Erg Occidental (Nord-Ouest du Sahara Algérien. Sécheresse, n°2, vol. 1, :124-133.
- Blackwell J., Jayawardane N. S. and Butler R. K., 1990 - Design, construction and preliminary testing of a slotting implement for gypsum enrichment of soil. J. Agric. Engng. Res., 46, :81-92.

- Bortoluzzi, E.C., 2003 - Nature des constituants, propriétés chimiques et physiques des sols. Modélisation des charges superficielles dans des sols sableux du Sud du Brésil, INAPG, 195p.
- Bottacin A. Cacco G. Saccomani M., 1984 - Nitrogen absorption and assimilation in NaCl-resistant and NaCl-susceptible millet genotypes (*Pennisetum americanum*). Can. J. Bot., 63:517-520.
- Boulaine J., 1978 - Cours d'hydropédologie INA-Engref. 193p
- Boulaine J., 1981 - Cours de pédologie typologique Tome I, INAPG. 91p.
- Bousnina H. et A. Mhiri, 1997 - Amélioration de la réserve utile des sols sableux des régions arides par un amendement argileux. Sécheresse, Vol. 8, n° 4 : 241-246.
- Brewer R., 1964 - Fabric and mineral analysis of soils. John Wiley and Sons, New York. 470p.
- Bruand A., Tessier D. et Baize D., 1988 - Contribution à l'étude des propriétés de rétention en eau des sols argileux : importance de la prise en compte de l'organisation de la phase argileuse. Compte rendu Acad. Sci. Paris, t. 307, Série II, : 1937-1941.
- Brun A. et Wacquant J. P., 1981 - Caractérisation d'une glycoprotéine chez *Suaeda macrocarpa* Mog. Physio. Vég., 19 (2), :145-153.
- Caillère S., Henin S. et Rautereau M., 1982 - Minéralogie des argiles ; structure et propriétés physico-chimiques. Masson et Cie, Paris. 184 p.
- Cailleux A. et Tricart J., 1963 - Initiation à l'étude des sables et des galets. Tome 1. Editions C.D.U., Paris. 369 p.
- Calu G., 2006 - *Arabidopsis thaliana* et *Thellungiella halophila*, plantes modèles dans l'étude du stress salin [en ligne], (Last update 9/01/2006), Web site at : <http://www.spectrosciences.com/spip.php?article23>
- Camara L., 1982 - Comportement hydrique et propriétés de gonflement macroscopique de mélanges d'argiles. Thèse Univ. Paris VI, 155 p.
- Chamayou H. et Legros J. P., 1989 - Les bases de la science du sol. Presses Universitaires de France, Paris. 593 p.
- Chaudhari S. K. and Somawanshi R. B., 2004 - Unsaturated flow of different quality irrigation waters through clay, clay loam and silt loam soils and its dependence on soil and solution parameters. Agricultural Water Management, n° 64, : 69-90.
- Chaudhari S. K., 2001 - Saturated hydraulic conductivity, dispersion, swelling, and exchangeable sodium percentage of different textured soils as influenced by water quality. Soil Science and Plant Analysis, n° 32, 2439-2455.
- Chevry C. et Robert M., 1998 - La dégradation des sols irrigués et de la ressource en eau : une menace pour l'avenir de l'agriculture et pour l'environnement des pays au sud de la Méditerranée. Etude et Gestion es Sols, Vol. 5, n° 4, : 217-226.
- Chevry C. et Robert M., 1993 - Salure des sols Maghrébins. Influence sur les propriétés physiques et physico-chimiques des sols. Répercussions des modifications de ces dernières sur la fertilité, notamment azotée, des sols. ENSA Rennes. 59p.

- Chohan T., 1974 - Influence de la concentration en NaCl du milieu de culture sur le comportement et le métabolisme de l'épinard, la tomate, la carotte, le sarrasin. Thèse de Doctorat de spécialité. Université de Nancy, 187p.
- Chrétien D., 1992 - La résistance au sel chez le jojoba (*Simmondsia chinensis* LS) : croissance et modification du contenu lipoprotéique de cals cultivés en présence d'une teneur élevée en NaCl. Thèse Doct, Univ., Paris VI, 144p.
- Chrétien J., 1971 - Essai de caractérisation des sables en tant que squelette minéral du sol. Ann. Agron., 22, (6), : 615-654.
- Chrétien J., 1986 - Rôle du squelette dans l'organisation des sols – conséquences sur les caractéristiques de l'espace poral des sols sur arènes et sur terrasses fluviales. Thèse Doc. Es Sci. Naturelles. Institut des Sciences de la terre. Univ. de Dijon. 412p.
- Colla G., Casa R., Cascio B-Io, Saccardo F., Temperini O., Leoni C., Io-Cascio B. and Bieche B. J., 1999 - Responses of processing tomato to water regime and fertilization in Central Italy. Proceedings of the Sixth International ISHS Symposium on the Processing Tomato and the Workshop on Irrigation and Fertigation of Processing Tomato, Pamplona, Spain, 25-29 May 1998. Acta-Horticulturae. 1999, No. 487, 531-535; 3 ref.
- Cooke R., Warren A. and Goudie A., 1993 - Desert geomorphology. London: UCL Press Limited. 526 p.
- Cornillon P. et Augé M., 1995 - Salinité : adaptation du piment. Revue Horticole, 363, : 39-43
- Dagnelie P., 2006 - Statistique théorique et appliquée. Tome 2. Inférence statistique à une et à deux dimensions (2ème édition). Paris et Bruxelles, De Boeck et Larcier, 734 p.
- Damidaux R. et Latterot H., 1989 - La sélection de la tomate d'industrie pour la France. Acta Horticulturae, 277, :203-206.
- Daoud Y. et Halitim A., 1994 - Irrigation et salinisation au Sahara algérien. Sécheresse, Vol.5, n°3, pp: 151-160
- Dautrebande G. S., 1982 - Amélioration des sols salins. Notes de cours. Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat. Gembloux. 163p
- Delane D., Buresh R. J. et Patrich W. H., 1979 - Relationship of soil properties to standin crop biomass of *Spartina alterniflora* in a Louisiana marsh. Estuarine Coastal Marine Sc., 8, p : 477- 487.
- Delauney A.J. et Verma D., 1995 - Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. Plant J., 4, : 215-23
- Dikinya O., Hinz C. and Aylmore G., 2006 - Dispersion and re-deposition of fine particles and their effects on saturated hydraulic conductivity. Australian Journal of Soil Research, n° 44 , : 47-56.
- Dorota Z. H., 1997 - Irrigating With High Salinity Water. [en ligne], Series of the Agricultural and Biological Engineering Department, Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. Original publication date February 1997. [Last revision December 2005]. Bul. 322, 5p. EDIS Web Site at <http://edis.ifas.ufl.edu>.

- Dubost D., 1992 - Aridité, agriculture et développement : le cas des oasis Algériennes. Sécheresse, vol. 3, n° 2, : 85-96.
- Duchaufour P., 2001. Introduction à la science du sol : sol, végétation, environnement. 6<sup>eme</sup> édition de l'Abrégé de Pédologie. Editions Dunod. 331 p.
- Dumbroff E.B., Cooper A.W., 1974 - Effects of salt stress applied in balanced nutrient solutions at several stages during growth of tomato. Bot.Gaz., 135, :219-224.
- Dur J. C., Elsass F., Chaplain V. et Tessier D., 2004 - The relationship between particle-size distribution by laser granulometry and image analysis by transmission electron microscopy in a soil clay fraction. Euro. J. of Soils Sci., 55, :265-70.
- Durand J. H., 1973 - Utilisation des eaux salines pour l'irrigation. B.T.I., 276, :39-58.
- El Fadl A., Dautrebande S. et Nisen A., 1990 - Besoins en eau de la tomate sous serres à climat régulé. Actes de l'Inst. Agron. Vét., vol. 10 (4), :33-40.
- Elsass F., Van Oort F., Le Mot Y. et Jaunet A.M., 2002 - Spéciation de métaux traces dans des sols contaminés à l'aide de la microscopie électronique analytique : cas des sols agricoles à proximité d'une friche industrielle (Mortagne-du-Nord). In: Baize D., Tercé M. (Eds.), Les Eléments Métalliques dans les Sols-Approches Fonctionnelles et Spatiales. INRA-Editions, Versailles, :331-352.
- El Sherif A. F., 1986 - Les diverses utilisations de la bentonite en agriculture. Edition ARST, Caire, Egypte, 131p.
- El Sherif A. F., 1987 - Projet de recherche sur l'amélioration des sols sableux, méthodes et aspects économiques, Rapport final. ARST, Caire, Egypte. 182p.
- El taif N. I. and Gharaibeh M. A., 2007 - Effects of Single and Mixed Ion Solutions on Hydraulic and Physical Properties of a Clay Soil. Water, Air, and Soil Pollution, Vol. 181, n°1, :297-302
- Engelthaler Z., 1985 - Production des métaux non ferreux et leur application dans l'agriculture-Onudi, Pilsen, Tchécoslovaquie, 231p.
- Faci J., Aragues R., Alberto F., Quilez D., Machin J. and Arrue J. L., 1985 - Water and salt balance in an irrigated area of the Ebro river basin. Irrig. Sci, 6, :29-37.USA.
- FAO., 1988 - Manuel de fixation des dunes. Cahier FAO conservation N° 18. 68p, Rome.
- FAO., 2005 - Utilisation des engrais par culture en Algérie. Publication de la FAO. Première édition. 56 p.
- Faure A., 1978 - Comportement des sols au compactage: rôle de l'argile et conséquences sur l'arrangement des grains. Thèse Doctorat d'Etat, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 137p, France.
- Favennec J., 1998 - Guide de la flore des dunes littorales non boisées : de la Bretagne au sud des Landes. Editeur Sud Ouest. 168p.
- Fiès J. C., 1971. Recherche d'une interprétation texturale de la porosité des sols. Ann. Agron., 22 (6), : 655-685.
- Filali B.A., 2004 - Enjeux stratégiques et défis majeurs de l'irrigation dans les pays du Maghreb. Actes du Séminaire sur la Modernisation de l'Agriculture Irriguée. Rabat, du 19 au 23 avril 2004. Projet Inco-Wademed, :1-10.

- Frenkel H., J.O. Goertzen and J.D. Rhoades, 1978 - Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. *Soil Sci.Soc.Am.J.* 42, : 32-39. NA.
- Geneviève C. G., 1994 - Érosion éolienne au Sahel et sécheresse. *Sécheresse*, Vol. 5, n° 3, : 199-210.
- Gourninard Y., 1958 - Recherche sur la géologie du littoral Oranais. Epitogénèse et nivellement. Service de la Carte Géologique de l'Algérie, Alger. 200p.
- Groenland D. J. and Szabolcs I., 1994 - Soil Resilience and Sustainable Land Use. United Nations Environment Program. Cab International, n°3, :145-153.
- Guichard S., Bertin N., Leonardi C. and Gary C., 2001 - Tomato fruit quality in relation to water and carbon fluxes. *Agronomie* 21, : 385–392
- Gupta R. K., and Abrol I. P., 1990 - Salt-affected soils: their reclamation and management for crop production. *Adv.Soil Sci.*, 11: 223-288.
- Hagemeyer J., 1999 - Ecophysiology of plant growth under heavy metal stress. In: M.N.V. Prasad, J. Hagemeyer (eds.): *Heavy Metal Stress in Plants - From Molecules to Ecosystems*. Springer-Verlag, Berlin, :157-181
- Hajji M et Grignon C., 1985 - Identification des transports de  $K^+$  ( $Rb^+$ ) affectés Par NaCl dans la racine du laurier-rose. *Physiol. Veg.* 23, pp :3-12.
- Halilat M. T et Tessier D., 2000 - Effets de la salinité et de la sodicité sur le comportement hydrique de mélanges sable-argile. *Etude et gestion des sols*, Vol. 7, n° 2, : 155-167.
- Halilat M. T et Tessier D., 2006 - Amélioration de la rétention en eau de matériau sableux par ajout de bentonite. *Cahiers Agricultures*, Vol. 15, n° 4, : 347-353.
- Halilat M. T., 1998 - Etude expérimentale de sable additionné d'argile, comportement physique et organisation en conditions salines et sodiques. Thèse Doct., INAPG, 229 p
- Halitim A., 1984 - Contribution à l'étude des sols des zones arides (hautes plaines steppiques de l'Algérie). Thèse de Doc. Es Sciences. Université de Rennes. 384p.
- Hamdi-Aissa B., Valles V., Aventurier A., Ribolzi O., 2004 - Soils and Brine Geochemistry and Mineralogy of Hyperarid Desert Playa, Ouargla Basin, Algerian Sahara. *Arid Land Research and Management*, 18: 103-126.
- Hamdy A., Choukr-Allah R. and Lahmer F. Z., 1997 - Effect of two types of soil and organic matter content on the growth of *Attriplex Halimus* in a saline medium. International conference on "water management, salinity and pollution control towards sustainable irrigation in the Mediterranean region, Special session, :149-170, I.A.M., Italy.
- Hartmann C., 1991 - Evolution et comportement de sols sablo-argileux ferralitiques sous culture de palmiers à huile. Thèse, Université Paris VI, Paris, France, 228p.
- Haseltine M., 2005 - Soils of arid regions of the United States and Israel. [en ligne], The International Arid Lands Consortium, Last update: 3 January 2005, [Last revision 05/11/2006]. Website of the Office of Arid Lands Studies: <http://cals.arizona.edu/OALS/soils/>

- Heller R., 1981 - Abrégé de physiologie végétale ; Nutrition. Tome 1. Editions Masson. Paris, 245p.
- Hillel D., 1974 - L'eau et le sol, principes et processus physiques. Academic press, New York and London, 288 p.
- Hillel D., 2005 - Salinity. In *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Eds. Elsevier/ Academic Press, Amsterdam et al., vol.3, : 435-442.
- Hoagland D. and Arnold I., 1938 - The culture method for growing plants without soil. Univ. Str. Aes. Cir. :341-1136.
- Holmgren K. and Öberg H., 2006 - Climate change in Southern and Eastern Africa during the past millennium and its implications for societal development. *Environment Development and Sustainability*, Volume 8, Number 1, : 185-95
- Jacoby B., 1966 - The influence of oligomycin on sodium and chloride uptake by beet root tissue. *Plant cell physiol.*, 7: 307-311.
- Jane B. E., 1966 - Adjustment of plants subjected to varied osmotic pressures of nutrient solutions. *Soil. Sc.*, 101, p: 180-188.
- Jarvis N.J., Zavattaro L., Rajkai K. Reynolds W.D. Olsen P-A., McGechan M., Mecke M., Mohanty B., Leeds-Harrison P.B. & Jacques D., 2002 - Indirect estimation of near-saturated hydraulic conductivity from readily available soil information. *Geoderma*, 108, : 1-17.
- Jayawardane N. S. and Greacen E. L., 1987 - The nature of swelling in soils. *Aust. J. Soil Res.*, 25, :107-113.
- Jayawardane N. S., 1992 - Prediction of unsaturated hydraulic conductivity changes of a loamy soil in different salt solutions by using the equivalent salt solutions concept. *Aust. J. Soil Res.*, 30, :565-571.
- Katerji<sup>1</sup> N., 1994 - Influence de la salinité du milieu sur la productivité des cultures: synthèse. 8<sup>th</sup> IWRA World Congress on Water Resources. November 21-25,1994, CIHEAM / IAM - BARI. 13p.
- Katerji<sup>2</sup> N., Van Hoorn J. W., Hamdy A., Karam F. and Mastrorilli A., 1994 - Effect of salinity on emergence and on water stress and early seedling growth of sunflower and maize. *Agricultural Water Management*, 26, :81-91.
- Katerji N., van Hoorn J.W., Hamdy A., Mastrorilli M., 2000 - Salt tolerance classification of crops according to soil salinity and to water stress day index. *Agricultural Water Management*, 43, :99-109
- Katerji N., Van Hoorn J.W., Hamdy A., Mastrorilli M., 2001 - Salt tolerance of crops according to three classification methods and examination of some hypothesis about salt tolerance. *Agricultural Water Management*, 47, :1-8.
- Keren R. and Ben-Hur M., 2003 - Interaction effects of clay swelling and dispersion, and CaC<sub>3</sub> content on saturated hydraulic conductivity. *Australian Journal of Soil Research* 41, :979-989. doi: 10.1071/SR02102.
- Keren R., Shainberg I. and E. Klein., 1988 - Settling and flocculation value of sodium montmorillonite particles in aqueous media. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, : 76-80



- Kheyrabi D. et G. Monnier, 1968 - Etude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. Agron.*, 19 (2), : 129-152.
- Lahlou M., Badraoui M., Souidi B., Goumari A. et Tessier D., 2002 - Modélisation de l'impact de l'irrigation sur le devenir salin et sodique des sols. Actes de l'atelier du PCSI, Montpellier, France, : 28-29.
- Lakhdari F., 1986 - Influence de la salinité sur la croissance et la nutrition minérale chez une Solanaceae « la tomate ». Thèse doctorat. U.S.T.L., Montpellier, 182p.
- Lal R., 1990 - Soil Erosion in the Tropics: Principles and Management. McGraw Hill, New York, USA. 213p.
- Lamotte M., 1995 - Les sols sableux à forte cohésion des zones tropicales arides. Etude du Hardé Lagadgé au Nord-Cameroun. Thèse, Université Paris VI, Paris, France, 315p.
- Lanson B. and Besson G., 1992 - Characterization of the end of the smectite-to-illite transformation. Decomposition of X-ray patterns. *Clays and Clay minerals*, 40, : 40-52.
- Laribi S., Fleureau J.-M., Grossiord J.-L. and Kbir-Arigoib N., 2005 - Comparative yield stress determination for pure and interstratified smectite clays. *Rheologica Acta*, vol. 44, n° 3, : 262-269.
- Larid M., 1993 - Le rôle du machinisme agricole dans l'érosion des sols - cas du plateau de Mostaganem Algérie. Thèse Doct. Univ. Louis Pasteur Strasbourg I. 108p.
- Lazof D. and Cheeseman J. M., 1986 - Sodium transport and compartmentation in *Spergularia marina*: partial characterization of a functional symplasm. *Plant Physiol* 81: 742-747.
- Le Bissonnais Y., 1996 - Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility : I. Theory and Methodology. *Europ. J. Soil Sci.*, 47, :425-437.
- Lebron I., Suarez D. L., and Alberto F., 1994 - Stability of a Calcareous Saline-Sodic Soil During Reclamation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 58, :1753-1762.
- Le Houerou H. N., 2000 - Restoration and rehabilitation of arid and semiarid Mediterranean ecosystems in North Africa and West Asia: A review. *Arid soil research and rehabilitation*, Vol 14, n° 1, :3-14.
- Le Houerou H. N., 2004 - An agro-bioclimatic classification of arid and semiarid lands in the isoclimatic Mediterranean zones. *Arid Land Research and Management*, Vol. 18, N° 4, : 301-46.
- Lehr J.J., 1984 - Exploratory pot experiments on sensitiveness of different crops to sodium. A. spinach. *Plant and Soil*, 2, p : 37-48.
- Le Ribault L., 1980 - Exoscopie des quartz : fiches signalétiques et interprétation des principaux caractères phénomorphiques. Thèse de doctorat d'Etat ès Sciences, Université Paris-Sud (Centre d'Orsay). 427 p.
- Lessani H. and Marschner H., 1977 - Relation between salt tolerance and long-distance transport of sodium and chloride in various crop species. *Plant Nutrition*, :27-37. Berlin.

- Lessard L., Oudard J. and Phan M., 1985 - Etude de l'organisation d'un sol argilo-limoneux, modélisation de la conductivité hydraulique à partir des relations expérimentales teneur en eau - succion. *Science du Sol*, 1985/2, : 75-88, Plaisir-France.
- Lesturgez G. 2005 - Densification des sols sableux sous culture mécanisée. Cas du Nord-Est Thaïlandais. Thèse Doct. Univ. Henri Poincaré I. 165p.
- Levigneron A., Lopez F., Vansuyt G., Berthomieu P., Fourcroy P. and Casse-Delbart F., 1995 - Les plantes face au stress salin. *Cahiers Agric.*, 4, : 263-273.
- Levitt J., 1980 - Salt and ion stress. *In* Levitt J. (eds). *Response of plant to environmental stresses. Vol II, water radiation, salt and others stresses.* New York: Academic Press, : 365-406.
- Levy G. J., Goldstein D. and A. I. Mamedov., 2005 - Saturated Hydraulic Conductivity of Semiarid Soils: Combined Effects of Salinity, Sodicty, and Rate of Wetting. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69, :653-662.
- Levy G. J., Rosenthal A., Torchitzky J., Shainberg I., and Cehn Y., 1999 - Soil hydraulic conductivity changes caused by irrigation with reclaimed waste waters. *Journal of Environmental Quality*, n°28, :1658-1664.
- Locascio S. J. and Smajstrla A. G., 1995 - Fertilizer Timing and Pan Evaporation Scheduling for Drip Irrigated Tomato. 5<sup>th</sup> International Micro-irrigation Congress, April 2-6, 1995, Orlando, Florida, :175-180.
- Lorne J. P., 1959 - Etude hydrologique du plateau de Mostaganem par la prospection électrique. Thèse Université d'Aix Marseille. 187p.
- Maas E. V. , Poss J. A. and Hoffman G. J., 1986 - Salinity sensitivity of sorghum at three growth stages. *Irrig. Sci*, 7, :1-11.USA.
- Mamedov A.I., G.J. Levy, I. Shainberg and J. Letey, 2001 - Wetting rate, sodicity and soil texture effects on infiltration rate and runoff. *Aust. J. Soil Res.*, 39, : 1293-1305
- Mathieu C. et Ruellan A., 1980 - Evolution morphologique des sols irrigués en région méditerranéenne semi aride. *Cahier ORSTOM, Série pédologie*, 13, :3-25.
- McIntyre D. S. and J. Loveday, 1979 - Sodicty, hydraulic conductivity and swelling of clay soils. *CSIRO, Journ. Div. Res., Div. Soils, Divisional Report n°39* : 9.
- Mederbal K., 1983 - La télédétection aérospatiale et la phytoécologie. Application à deux régions naturelles d'Algérie: le littoral (Mostaganem) et l'Atlas saharien (Djelfa). Thèse Doct. 3<sup>ème</sup> cycle, Université d'Aix-Marseille III, 178p.
- Meunier J. et Rognon P., 2000 - Une méthode écologique pour détruire les dunes mobiles. *Sécheresse*, Vol.11, n°4, :309-316.
- Millot G., 1964 - Géologie des argiles, altérations, sédimentologie et géochimie. Editions Masson, Paris. 500 p.
- Minasny B. and McBratney AB., 2001 - The Australian soil texture boomerang: a comparison of the Australian and USA/FAO soil particle-size classification systems. *Australian Journal of soil research* Vol 39, n°6, :1443-1451.
- Miossec A., 1990 - L'évolution des milieux naturels fragiles du littoral. *Revue juridique de l'environnement*, n°4, : 521-534.

- Mitchell J.P., Shennan C., Grattan S.R., 1991 - Developmental changes in tomato fruit composition in response to water deficit and salinity. *Physiol. Plant.* 83,: 177-185.
- Mizoguchi M. and Shibata T., 1995 - Effect of Ammonium Sulfate Concentration on Hydraulic Conductivity of Sedimented Na-Clay, [en ligne], *Agronomy Abstracts*, 207, St. Louis, Missouri, USA. [Réf. 24/05/07]. <http://soil.en.a.u-tokyo.ac.jp/~mizo/intern/asa95.html>
- Mizrahi Y., Blumenfeld A. , Bittner S. and Richmond A. E., 1971 - Abscisic Acid and Cytokinin Contents of Leaves in Relation to Salinity and Relative Humidity. *Plant Physiol.*, 48 (6), :752-755.
- Mizrahi Y., Taleismik E., Kajan-Zur V., Zohar Y., Offenbach R., Matun E., Golan R., 1988 - A saline regime for improving tomato fruit quality without reducing yield. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 113, :202-205.
- Molle P., 2003 - Filtres plants roseaux ; limites hydrauliques et rétention du phosphore. Thèse de Doct. Université de Montpellier II. 267p.
- Monneveux P. et This D., 1997 - La génétique face au problème de la tolérance des plantes cultivées à la sécheresse : espoirs et difficultés. *Sécheresse*, Vol. 8, n° 4 : 241-246.
- Mougou A., 1984 - Evaluation de la résistance à la sécheresse par des paramètres morphologiques, écophysologiques et biochimiques chez plusieurs espèces de tomates. Thèse de Doc. Es Sciences, Unité de l'Etat à Gand, 208p.
- Mougou A., Derbel S., Verlod H., 1993 - Control of salinization in sandy substrate used for a tomato crop. In: *Workshop on environmentally sound water management of protected agriculture under mediterranean and arid climates*, IAM-Bari Ch. 11, :3-21.
- Munns R. and Termaat A., 1986 - Whole-plant responses to salinity. *Aust.J.Plant Physiol.*, 13,:143-160.
- Murillo-Amador B., Troyo- Diéguez E., García-Hernández J. L., López-Aguilar R., Ávila-Serrano N. Y., Zamora-Salgado S., Rueda-Puente E. O. and Kaya C., 2006 - Effect of NaCl salinity in the genotypic variation of cowpea (*Vigna unguiculata*) during early vegetative growth. ***Scientia Horticulturae*** , 108 (4), :423-431
- Musy Y. et El Soutter M., 1991 - *Physique du sol*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Collection gérer l'environnement.335p.
- Nanjo T., Kobaychi M., Yochiba Y., Sanada Y., Wada K., Tsukaya H., Kakubari Y., Yamaguchi and Shinozaki K., 1999 - Biological functions of proline in morphogenesis and osmotolerance revealed in antisense transgenic arabidopsis thaliana. *Plant J.*, 18:2, :185-193.
- Nasr N., 2004 - Importance de la diversité génétique du palmier dattier dans la conservation des oasis et l'amélioration des conditions de vie des populations oasiennes au Maghreb. Actes de l'Atelier régional : « Protection Intégrée (IPM) du Palmier Dattier dans les pays de l'Afrique du Nord », Tunisie 11-13 Décembre 2003, FAO-Iresa Tunisie, Tozeur. 7 p.
- Northcote K. H., and Skene J. K. M., 1972 - Australian soils with saline and sodic properties. CSIRO Australia Soil Publication No. 27.

- Odum H. T. and Eugene P., 1984 - Properties of agro ecosystems, In: *Agricultural Ecosystems*, Lowrance R., Stinner B.R., and House G.J., Eds. John Wiley & Sons, New York. : 8-11.
- Oster J. D. and Shainberg I., 1991 - Soil responses to sodicity and salinity: challenges and opportunities. *Australian Journal of Soil Research*, 39(6),: 1219-1224
- Petr J., 1985 - Non metallic sorbents in agriculture. Editions ONUDI, Tchécoslovaquie. 39p.
- Pintore M., Deiana S., Demontis P., Manunza B., Suffritti G. B. and Gessa C., 2001** - Simulations of Interlayer Methanol in Ca- and Na- Saturated Montmorillonites Using Molecular Dynamics. *Clays and Clay Minerals* , Vol, 49, n° 3, : 255-262.
- Pitman M.G., 1976 - Ion uptake by plant roots, in *Encyclopedia of Plant Physiology New Series vol. 2. Transport in Plants II Part B Tissues and Organs* , eds U. Lüttge and M.G. Pitman (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York), : 95-126.
- Pupisky H., and Shainberg. I., 1979 - Salt effects on the hydraulic conductivity of a sandy soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43, pp :429-433.
- Radi Y., 1991- Influence des conditions salines sur les propriétés physiques de la bentonite de Maghnia. Mémoire d'ingénieur. USTHB Alger. 140p.
- Rains D. W. and Emanuel E., 1967 - Sodium Absorption by Barley Roots: Role of the Dual Mechanisms of Alkali Cation Transport1. *Plant Physiol*, 42, :314-318.
- Rengasamy P. and Olsson K. A., 1993 - Irrigation and sodicity. *Aust. J. Soil Res.*, 31, : 821-837.
- Rhoades J. D., A. Manteghi Nahid, P. J. Shouse and W. J. Alves, 1989 - Estimating Soil Salinity from Saturated Soil-Paste Electrical Conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol 53, : 428-33.
- Righi M. and Elsass F., 1996 - Characterization of soil clay minerals: decomposition of X-ray diffraction diagrams and high-resolution electron microscopy. *Clays and clay minerals*, 44, n°6, : 791-800.
- Ritchie J.C., Rango A., Kustas W.P., Schmutge T.J., Havstad K.M., Everitt J.H., Hipps L.E., and Ramalingam K., 1998 - JORNEX: A remote sensing campaign to study plant community response to hydrologic fluxes in desert grasslands, : 65-74. In: D.F. Potts (ed.), **Rangeland Management and Water Resources** , American Water Resources Society, Herdon, VA. (Chapter)
- Robert M. et Tessier D., 1974 - Méthode de préparation des argiles des sols pour études minéralogiques. *Ann. Agron.* N°25 (6), : 859-882.
- Robert M., 1975 - Principes de détermination qualitative des minéraux argileux à l'aide des rayons X. *Ann. Agron.* N°26 (4), : 363-399.
- Robert M. and Cheverry C., 1996 - Les ressources mondiales en eau et en sols : une limitation pour l'avenir. *Cahiers « Agricultures »*, Vol.5, n°4,: 243-248, France.
- Robert M., 1977 - Exemples d'utilisation de l'analyse thermique en minéralogie, stage sur les méthodes d'analyse thermique et leur application à l'étude des matériaux. CNRS, SETAR. 14 p.

- Robert M., 1992 - Le sol, une ressource naturelle à préserver pour la production et l'environnement. Cahier Agriculture, 1: 20-34
- Rochdi A., Lemsellek J., Bousarhal A., Rachidai A., 2005 - Évaluation sous serre de la tolérance à la salinité de quelques porte-greffes d'agrumes : *Citrus aurantium* et deux hybrides de *Poncirus trifoliata* (*Poncirus x Citrus sinensis* et *Poncirus x Mandarinier sunki*). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2005 9 (1), 65-73
- Rouillois-Brigol M., 1973 - Le pays d'Ouargla Sahara Algérien : variation et organisation d'un espace rural en milieu désertique. Département de géographie de l'Université de Paris-Sorbonne, 488p.
- Ruiz-Vera V. M. and Wu L.** , 2006 - Influence of Sodicity, Clay Mineralogy, Prewetting Rate, and Their Interaction on Aggregate Stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* ; 70: 1825-1833.
- Sadran G., Millot G. et Bonifas M., 1955 - Sur l'origine des gisements de bentonites de Lalla Maghnia. Pub. Serv. Carte Algérie, Trav. Coll., 5, : 213-214.
- Sally L. D. and David L. A., 2004 - Electrical conductivity spectra of smectites as influenced by saturating cation and humidity. *Clays and clay minerals*, Vol. 52, n° 4, : 411- 420.
- Satti S.M.E. and Al-Yahyai R.A., 1995 - Salinity tolerance in tomato: implications of potassium, calcium, and phosphorus. *Communications-in-soil-science-and-plant-analysis (USA)*, Vol, 26(17/18), : 2749-2760.
- Scherr Sara J. et Yadav S., 1997 - Dégradation des sols dans le monde en développement : Questions et options décisionnelles pour 2020. Publication of International Food Policy Research Institute. n°44. 5 p.
- Shannon M. C. and Grieve C. M., 1999 - Tolerance of vegetable crops to salinity. *Scientia Horticulturae*, n° 78, : 5-38, USSL, USA.
- Skiredj A., 2005 - **La culture de tomate sous abri. [en ligne]**, Département d'Horticulture/IAV Hassan II/Rabat/ Maroc : Fertigation-s, [Last update (03/08/2005)]. Web site : <http://www.fertigation-s.com/culture-tomate-abri.php>
- Slama<sup>1</sup> F., 1986 - Intervention des racines dans la sensibilité ou la tolérance à NaCl de plantes cultivées. *Agronomie*, 6 (7), :651-658.
- Slama<sup>2</sup> F., 1986 - Recherches sur les causes de l'exclusion du sodium des feuilles des plantes sensibles à NaCl. *INAT, Tunis, Agronomie*, 7 (7), :517-522.
- Smith G. S., Middleton K. R., 1980 - **Sodium Nutrition of Pasture Plants. I. Translocation of Sodium and Potassium in Relation to Transpiration Rates.** *New Phytologist* , 84, (4), :603-612.
- Sneed R. and Folk R., 1958 - Pebbles in the lower Colorado river. *Journal of geology*, N°66, pp : 114-150.
- Soltner D., 2000 - Les bases de la production végétale. Le sol et son amélioration, Tome I. Editions : Sciences et Techniques Agricoles. 22<sup>eme</sup> édition. 472p.
- Sonneveld C., 1988 - The salt tolerance of greenhouse crops. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 36, : 63-73.

- Sposito G., Holtzclaw K. M., Charlet L., Jouany C. and Page A. L., 1983 - Sodium-Calcium and Sodium-Magnesium exchange on Wyoming bentonite in perchlorate and chloride background ionic media. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, : 51-56
- Spurr A. R., 1969 - A low-viscosity epoxy resin embedding medium for electron microscopy. *Ultrastucture Research*, n° 26, : 31-43.
- Stengel P. and Gelin S., coord., 1998 - Sol interface fragile. Editions l'INRA, Paris. 214p.
- Stengel P., 1981 - Relations entre le retrait et le potentiel de l'eau dans des mélanges smectite-limon. *CR Acad. Sc. Paris*, t. 293, serie II, :465-468.
- Szabolcs I., 1993 - Strategies for utilization of the salt affected soils in the World. *Acta Agronomica*, 42. (1-2), :39-144.
- Tessier D. et Pédro G., 1984 - Recherches sur des minéraux argileux dans l'organisation et le comportement des sols. Livre Jubilaire du Cinquenaire de l'AFES, : 223-234. France.
- Tessier D., 1975 - Recherches expérimentales sur l'organisation des particules dans les argiles. Thèse Ing. C.N.A.M. Paris, 230p.
- Tessier D., 1984 - Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse Doct. Es Sci. Univ. Paris VII, France, 361p.
- Tessier D., 1994 - Rôle de l'eau sur les propriétés physiques des sols. *Sécheresse*, Vol.5, n°3, :143-150.
- Tolba M. K., 2001 - Our Fragile World : *Challenges and opportunities for sustainable development*, Volumes I and II. Eolss Publishers, Oxford, . 2263 p.
- Tomato News, 2006 - Report of tomato processing in Algeria. Site web of Tomato news. About The Tomato Processing Industry. World processing tomato council. <http://www.wptc.to/pdf/Algeria%202006.pdf>. Last updated June 2006.
- Toutain G., 1974 - La micro-exploitation phœnicicole Saharienne face au développement. *Opt. Médit*, 26, :73-81.
- Van Hoorn J.W., Katerji N., Hamdy A., Mastrorilli M., 1993 - Effect of saline water on soil salinity and on water stress, growth and yield of wheat and potatoes. *Agric. Water Manage*, 23, :247-265.
- Vatan A., 1967- manuel de sédimentologie. Editions Technip. 395p.
- Wacquart C., 1995 - Maîtrise de la conduite climatique. Tomate sous serre et abris, CTIFL, Paris, 127 p.
- Walker RR, Blackmore DH and Sunquing D., 1993 - Carbon dioxide assimilation and foliar ion concentration in leaves of lemon (*Citrus limon* L.) trees irrigated with NaCl or Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. *Aust J Plant Physiol*, n° 20, :173-185.
- Ward M. R., Aslam M., Huffaker R. C., 1986 - Enhancement of Nitrate Uptake and Growth of Barley Seedlings by Calcium under Saline Conditions . *Plant Physiol*, 80(2):520-524.
- Williams R. D. and Ahuja L. R., 1994 - Estimating the Soil Water Retention Curve with Soil Bulk Density and -33 kPa Value. Summary of a paper presented at the 14<sup>th</sup>

Annual AGU "Hydrology Days", April 5-8, 1994, Colorado State University Fort Collins. 15p. USA.

Wuytack R. et Gillet C., 1978 - Nature des liaisons de l'ion calcium dans les parois de *Nitella flexilis*. Ca. J. Bot., 56, :1439-1443.

Yeo A. R., Kramer D., Läubli A., Gullasch J., 1977 - Ion distribution in salt-stressed mature Zea mays roots in relation to ultrastructure and retention of sodium. J. Exp. Bot., 28, :17-29.

Zekri M., 1993 - Salinity and calcium effects on emergence, growth and mineral composition of seedling of eight citrus rootstocks. *Ann Botany* ; 72, p : 45-7.

[1] Le premier à avoir défini l'indice de sphéricité

[2] Par simplification nous utiliserons la notation pF pour caractériser le potentiel matriciel

[3] Par convention le potentiel matriciel est exprimé en terme de pF

[4] Test de Snedecor

[5] Moyenne des valeurs obtenues dans un bloc avec tous les traitements de salinité et de sodicité à différents pF

[6] Nous n'avons représenté dans cette figure que les graphes relatifs aux doses de 5 et 20% de bentonite pour leurs évolutions très proches de celles respectivement de 0 et 10% de bentonite, ce qui permet de désencombrer la figure

[7] Film plastique couramment commercialisé dans le marché et fabriqué par la Société Nationale de Transport, de Transformation et de Commercialisation des Hydrocarbures et de leurs dérivés (Sonatrach).

[8] les diminutions  $\geq 50$  % sont soulignées dans le tableau 32