

Classement de variétés de blé (*Triticum durum* Desf.) pour la tolérance au stress salin par analyse multivariée de grappes de quelques paramètres agrophysiologiques à différents stades de croissance

[Ranking wheat (*Triticum durum* Desf.) varieties for salt tolerance by multivariate cluster analysis of some agrophysiological parameters at different growth stages]

M. Ouhaddach¹, S. Ech-cheddadi¹, I. Oualla¹, F. Gaboun², H. El Yacoubi¹, and A. Rochdi¹

¹Laboratoire d'AgroPhysiologie, Biotechnologies, Environnement & Qualité, Equipe d'Agrophysiologie & PhytoBiotechnologie, Université Ibn Tofail, Faculté des Sciences, Kénitra, Maroc

²Institut National de la Recherche Agronomique, Unité de Recherche en Biotechnologie, Rabat, Maroc

Copyright © 2019 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The effect of soil salinity on some agrophysiological parameters at different stages of growth (Elongation and Heading) was studied in four varieties of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) Namely: Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) and Tomouh (V4), under control of three saline levels (3, 6 and 9 g / l NaCl). The results obtained show that the salinity leads to an increase in the water content, the sugar content and the Na⁺ and Cl⁻ content. However, a decrease in plant length, number of leaves, number of plants, last leaf length, fresh and dry biomass, K⁺ content, K⁺ / Na⁺ ratio, and number of spikes was observed. The results prove the tolerance to salinity of the variety Carioca (V1) compared to other varieties. This tolerance is manifested by a lower decrease in fresh and dry biomass, K⁺ content and yield. Also, this variety was characterized by a lower salt sensitivity index (I.S.R.S) and a low accumulation of Na⁺ and Cl⁻ especially at higher concentrations (6 and 9 g / l NaCl).

KEYWORDS: Salinity, Durum wheat, Elongation stage, Heading stage, Agrophysiology.

RESUME: L'effet de la salinité du sol sur quelques paramètres agrophysiologiques à différents stades de croissance (Montaison et Epiaison) a été étudié chez quatre variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) à savoir : Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), sous contrôle de trois niveaux salins (3, 6 et 9 g/l NaCl). Les résultats obtenus montrent que la salinité entraîne une augmentation de la teneur en eau, de la teneur en sucres et de la teneur en Na⁺ et Cl⁻. Cependant, une diminution de la longueur des plantes, du nombre des feuilles, du nombre de plantes, de la longueur de la dernière feuille, de la biomasse fraîche et sèche, de la teneur en K⁺, du rapport K⁺/Na⁺ et du nombre d'épis a été observée. Les résultats prouvent la tolérance à la salinité de la variété Carioca (V1) par rapport aux autres variétés. Cette tolérance se manifeste par une diminution plus faible dans la biomasse fraîche et sèche, de la teneur en K⁺ et du rendement. Aussi, cette variété a été caractérisée par un indice de sensibilité relative au sel (I.S.R.S) plus faible et une faible accumulation de Na⁺ et Cl⁻ notamment à des concentrations plus élevées (6 et 9 g / l NaCl).

MOTS-CLEFS: Salinité, Blé dur, Stade montaison, Stade épiaison, Agrophysiologiques.

1 INTRODUCTION

L'extension de l'agriculture irriguée et l'utilisation intensive des ressources en eau, combinées à une forte évaporation dans les régions arides et semi-arides, conduit inévitablement à la salinisation des sols et des nappes d'eau (Radhouane et al., 2008). De nombreuses régions arides et semi-arides dans le monde contiennent des sols et des ressources en eau qui sont trop salines pour la plupart des cultures économiques communes, qui affectent les plantes par des effets osmotiques, des effets spécifiques d'ions et par le stress oxydatif (Munns, 2002; Pitman et Lauchli, 2002). En effet, la salinité affecte environ 70% des terres du globe (Bahrani et HaghJoo, 2012) correspondant environ à 800 millions d'hectares (Sangeeta et al., 2011).

Au Maroc, la salinité a affecté plusieurs nappes des principales zones agricoles telles que le Tafilalet, Moulouya, Gharb, Loukous, Souss Massa, Tadla, Doukkala et Haouz, et elle a aussi affecté quelques oueds (Oum er Rbia dans le Tadla, Oued El Malh à Ouarzazate, etc.). Durant ces dernières années, ce phénomène s'accroît avec les changements climatiques et s'étend sur plusieurs zones avec des effets néfastes à la fois sur les sols, les cultures et l'hydrobiologie. Dans plusieurs régions, les concentrations salines ont atteint des valeurs qui les rendent non appropriées à l'irrigation (Debbarh et Badraoui, 2002). L'accumulation des sels dans le profil du sol en quantité suffisante peut affecter ses aptitudes agronomiques en provoquant ainsi un stress chez les plantes (Camara et al., 2015).

Le blé est parmi les céréales la plus cultivée au monde, qui représente une importante ressource pour l'alimentation et une matière première pour l'industrie (Charmet, 2011). La demande mondiale d'aliments pour une population toujours croissante devrait augmenter d'environ 40% en 2030 (Dixon et al., 2009). Aujourd'hui, les pays en développement fournissent les deux tiers de la production céréalière mondiale (FAO, 2015). Au Maroc, la superficie semée par les trois principales céréales d'automne (blé tendre, blé dur et orge) atteint en moyenne près de 4,77 millions hectares, (MAPM, 2012).

La salinité affecte presque tous les aspects physiologiques et biochimiques des plantes, et diminue significativement le rendement. Plusieurs travaux ont montré que l'effet du stress salin sur la croissance entraîne la diminution du nombre de feuilles (Gama et al., 2007 ; Ha et al., 2008) et de la surface foliaire (Zhao et al., 2007 ; Yilmaz et Kina, 2008).

La longueur de la plante est négativement affectée parallèlement à l'augmentation de la concentration de chlorure de sodium (Rui et al., 2009 ; Memon et al., 2010). La réponse au sel des espèces végétales dépend de plusieurs variables, commençant par l'espèce elle-même, de sa variété, aussi de la concentration en sel, des conditions de culture et du stade de développement de la plante (Naceur et al., 2001 ; Alaoui et al., 2013).

Chez le blé, plusieurs travaux de recherche ont été focalisés sur l'étude de l'effet de la salinité (Cheraghi, 2004 ; Dehdari et al., 2007 ; Asgaria et al., 2012) sur le rendement. Ces auteurs ont rapporté une corrélation étroite entre les rendements et les conditions du stress salin.

L'objectif du présent travail pourrait être décomposé en trois niveaux :

- 1) Etudier et analyser les changements de quelques paramètres agrophysiologiques du blé (*Triticum durum* Desf.) face à un stress salin en deux stades de croissance (montaison et épiaison).
- 2) Choisir parmi les critères étudiés, ceux qui indiqueraient le mieux la tolérance du blé dur à la salinité.
- 3) Classer les variétés de blé dur en fonction de leur tolérance vis-à-vis de stress salin.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 MATÉRIEL VÉGÉTAL

Les expérimentations ont été menées sur quatre variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) V₁: Carioca (précoce à l'épiaison), V₂: Karim (précoce à l'épiaison), V₃: Tarik (demi-précoce à l'épiaison) et V₄: Tomouh (demi-précoce à l'épiaison) répertoriées sur le catalogue officiel des variétés de l'ONSSA (Office National de Sécurité Sanitaire des produits Alimentaires).

2.2 MÉTHODES ET DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Les graines des quatre variétés de blé dur ont été mises à germer dans des pots en plastique de 5 litres, dont le fond a été percé de trois petits trous et tapissé par du gravier (2 cm), afin de permettre le drainage, ensuite rempli par le sol sableux de la forêt Maamora (sol constitué par une couverture de sable reposant sur un niveau argilo-sableux à sablo-argileux ancien), qui a été abondamment lavé à l'eau courante.

Les pots, contenant chacun 20 graines, ont été disposés de façon aléatoire sous un tunnel en plastique avec des températures comprises entre 20°C la nuit et 34°C le jour. L'irrigation a été effectuée avec de l'eau une fois par semaine jusqu'au stade quatre feuilles. A ce stade, le nombre de plantes par pot a été réduit à six. Ainsi, à partir de ce stade (stade tallage), 4 niveaux de NaCl (0, 3, 6 et 9 g/l) ont été appliquées, à 4 répétitions (ou pots), contenant chacun 6 plantes.

L'irrigation a été appliquée trois fois par semaine, avec le premier apport de 1000 ml/pot de la solution nutritive avec ou sans sel (0, 3, 6 et 9 g/l NaCl). Après drainage, la masse de trois pots a été pesée pour chaque niveau de stress. L'arrosage de compensation des pertes d'évapotranspiration a été effectué par les différentes solutions jusqu'à la capacité au champ. Parallèlement et en vue d'éviter l'effet cumulatif de l'apport du sel dans le substrat, un lessivage à l'eau de forage (conductivité électrique (CE) : 0,46 mS/cm ; pH : 7,5) a été pratiqué chaque fin de deux semaines, suivi par le rétablissement du niveau de stress salin par ajout de 1000 ml/pot de la solution nutritive avec ou sans sel.

Le traitement a été appliqué jusqu'au stade montaison pour la première durée d'essai (D1) et jusqu'au stade épiaison pour la deuxième durée d'essai (D2).

Le dispositif expérimental est un bloc aléatoire complet avec 4 répétitions. Les facteurs analysés sont la durée de stress (montaison (D1) et épiaison(D2)), le traitement salin (0, 3, 6 et 9 g/l NaCl) et les variétés de blé (Carioca (V1), Karim (V2), Tarik (V3) et Tomouh(V4)).

2.3 PARAMÈTRES ÉTUDIÉS

- La **hauteur des plantes (H)** (longueur du maître-brin exprimée en cm), le **nombre de tiges**, **longueur de feuille** et le **nombre des feuilles** ont été mesurés à la fin de chaque durée de stress (Montaison ou Epiaison).
- La **biomasse (aérienne et racinaire)** est déterminée à la fin de chaque durée de stress, par la pesée de la masse de matière fraîche, puis sèche après séchage dans une étuve à ventilation à 70°C pendant 48 heures. Elle est mesurée pour les parties aérienne et racinaire.
- Les paramètres physiologiques et biochimiques ont été mesurés à la fin de chaque essai ; à partir de l'avant dernière feuille pour la teneur en eau, la teneur relative en eau, ainsi que pour le dosage des solutés organiques et inorganiques.
- Pour la **teneur en eau (TE)** des feuilles : les feuilles ont été coupées à la base du limbe, pesées immédiatement pour obtenir le poids frais (PF). Les échantillons ont été ensuite mis à l'étuve à 80°C pendant 48h et pesés pour avoir le poids sec (PS). La teneur en eau par la formule $TE = 100 \cdot (PF-PS) / (PF)$.
- Pour le dosage des solutés organiques, l'extraction de solutés a été réalisée à partir de 0,5 g de matière fraîche, prélevée de l'avant dernière feuille. Les échantillons ont été mis dans des tubes à essai et malaxés en présence de 5 ml d'éthanol à 95%. Après une nuit de macération, le mélange est mis à chauffer au bain marie (95°C) jusqu'à l'évaporation totale de l'éthanol. Le résidu obtenu est alors solubilisé dans 25 ml d'eau distillée et les tubes ont été vigoureusement agités à l'aide d'un vortex. Le surnageant obtenu est l'extrait végétal qui sert à doser les solutés organiques extractibles par cette méthode.
- Pour le dosage **des sucres solubles**, 1 ml de réactif au phénol (5% dans de l'eau distillée) et 1ml d'extrait végétal ou de la gamme de glucose sont homogénéisés dans un tube à essai, puis 5 ml d'acide sulfurique concentré ont été ajoutés en un seul jet. L'ensemble a été agité rapidement au vortex puis les tubes ont été placés au bain marie à 100°C pendant 5 min. Après un repos de 30 min, l'absorbance a été mesurée à 492 nm. (Dubois *et al.*, 1956).
- Pour l'**anion Cl⁻** : la matière sèche (aérienne et racinaire) a été broyée et pesée dans une capsule en porcelaine puis mélangée avec Ca (OH)₂ pour fixer les chlorures. De l'eau distillée a été rajoutée pour former une pâte fine qu'on met au four à moufle à 500°C pendant 4h (la température est augmentée par palier de 50°C). Ensuite, après refroidissement, 15 ml d'eau chaude ont été rajoutées aux échantillons minéralisés qu'on met sur plaque chauffante avant de filtrer dans une fiole jaugée de 50ml. Le pH des solutions a été ensuite réglé à 6-7, avant titrage par volumétrie avec le nitrate d'argent à 10-2 N, en utilisant le chromate de potassium à 1% comme indicateur coloré.
- Pour les **cations Na⁺ et K⁺**, la calcination a été réalisée comme pour les chlorures, mais sans ajout de Ca(OH)₂. Les solutions ainsi obtenues ont été ensuite passées au photomètre à flamme après étalonnage de l'appareil par une gamme étalon de 0 - 2,5 - 5 - 7 - 5 et 10 mg/l de KCl ou NaCl.
- La réponse des variétés au stress a été évaluée à l'aide de leur biomasse et de leur **indice de sensibilité relative au stress ou I.S.R.S.** qui traduit le rapport de la sensibilité d'un cultivar donné (exprimée par le déficit relatif de biomasse dû au stress ou D.R.B.) à la sensibilité moyenne de l'ensemble des cultivars ou indice d'intensité du stress (I.I.S.). Il s'écrit :

$$I.S.R.S. = D.R.B. / I.I.S. \text{ (Fisher et al., 1978)}$$

$$\text{Avec } D.R.B. = (BT't' - BT's') / BT't'$$

$$BT : \text{ biomasse totale moyenne d'un cultivar donné en absence de stress (t) ou sous stress (s), et } I.I.S. = (M't' - M's') / M't'$$

M est la biomasse totale moyenne de tous les cultivars en l'absence de stress (t) ou sous stress (s).

2.4 ANALYSES STATISTIQUES

Les données obtenues ont été soumises à des analyses de variances réalisées avec le logiciel SAS. Les effets révélés significatifs ont été alors soumis à des comparaisons multiples de moyennes par le test (LSD). Une analyse en composantes principales (ACP) est faite pour identifier les principales variables discriminantes des génotypes soumis au stress salin. Le but

est d'identifier les variables qui pourraient servir de critères de base pour la sélection de génotypes tolérants au stress salin. Une classification hiérarchique a été effectuée pour constituer des groupes de traitements homogènes.

3 RÉSULTATS

3.1 PARAMÈTRES DE CROISSANCE

3.1.1 HAUTEUR DE LA TIGE

L'analyse de la variance globale a montré que l'effet de la salinité est très hautement significatif mais l'effet « variété » et l'effet « durée de traitement » sur la hauteur de la tige sont non significatifs. Les résultats obtenus montrent que la longueur des plantes a été légèrement affectée par la salinité au stade montaison (D1) chez les quatre variétés (Fig. 1). Cependant, au stade épisaison (D2), toutes les quatre variétés ont montré une réduction de la hauteur suite à l'irrigation par l'eau saline (Fig. 2). A une concentration de 9 g/l de NaCl la réduction a été de 36% et 40% respectivement chez Carioca (V1) et Karim (V2) et de 30% et 29% respectivement chez Tarik (V3) et Tomouh (V4).

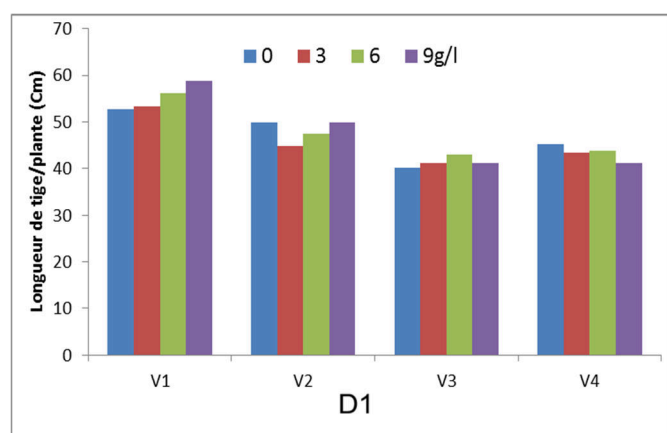


Fig. 1. Longueur (cm) des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées au stade montaison (D1) avec différentes concentrations en NaCl.

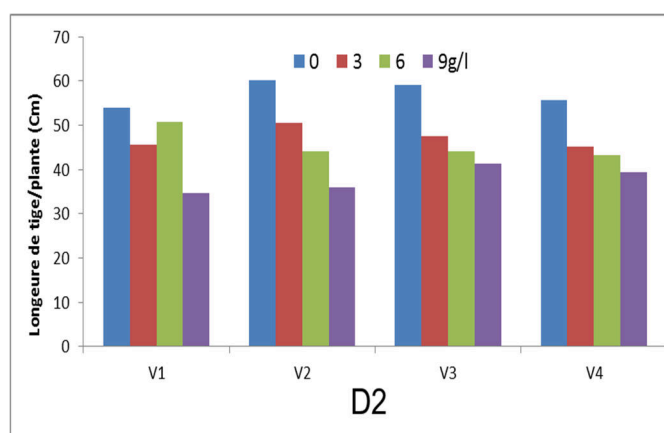


Fig. 2. Longueur (cm) des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées pendant le stade épisaison (D2) avec différentes concentrations en NaCl.

3.1.2 NOMBRE DE PLANTES

L'analyse statistique a montré un effet très hautement significatif de la salinité et du stade de développement sur le nombre des plantes. Le nombre des plantes chez le blé est un paramètre important qui conditionne le rendement. Pour toutes les concentrations de NaCl, le nombre de plante a été diminué chez les quatre variétés de blé dur et la variation par rapport au témoin a été accentuée pour la concentration de NaCl pendant les deux durées de stress (Fig. 3 et 4). Ainsi, les variétés Karim (V2) et Tarik (V3) ont été caractérisées par le nombre de plantes le plus important par rapport aux variétés Carioca (V1) et Tomouh (V4) qui ont montré un nombre de plantes très réduit. Cependant, la réduction la plus forte a été enregistrée au stade épisaison.

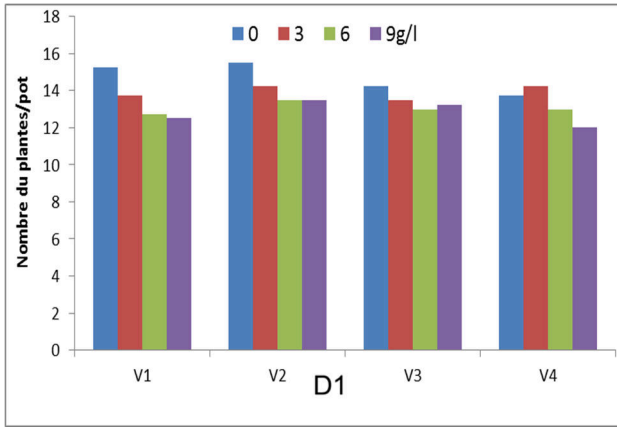


Fig. 3. Nombre des plantes de blé dur, au stade montaison (D1), chez des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

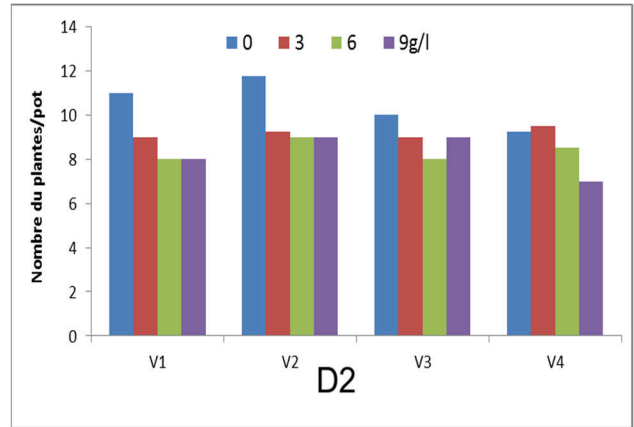


Fig. 4. Nombre des plantes de blé dur, au stade épiaison (D2), chez des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

3.1.3 NOMBRE DE FEUILLES

L'analyse de la variance pour le nombre des feuilles a montré une différence très hautement significative pour les effets de la salinité et de la durée de traitement et significative pour la variété. Les valeurs notées pour le nombre de feuilles, au stade montaison (D1), montrent que les variétés Carioca (V1), Karim (V2) et Tarik (V3) ont été caractérisées par le nombre de feuilles le plus important par rapport à la variété Tomouh (V4) qui a montré un nombre de feuilles très réduit (Fig. 5). Cependant, au stade épiaison (D2) (Fig. 6), l'augmentation de la concentration en NaCl dans la solution d'arrosage provoque la réduction du nombre des feuilles chez les quatre variétés de blé dur. Ainsi, à 9g/l NaCl, le nombre de feuilles a été réduit de 10% chez Carioca (V1) et Karim (V2) et de 14% et 19% chez Tarik (V3) et Tomouh (V4) respectivement.

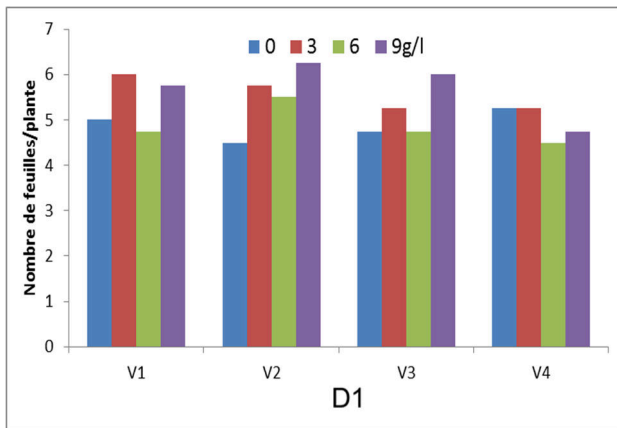


Fig. 5. Nombre de feuilles, au stade montaison (D1), chez des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

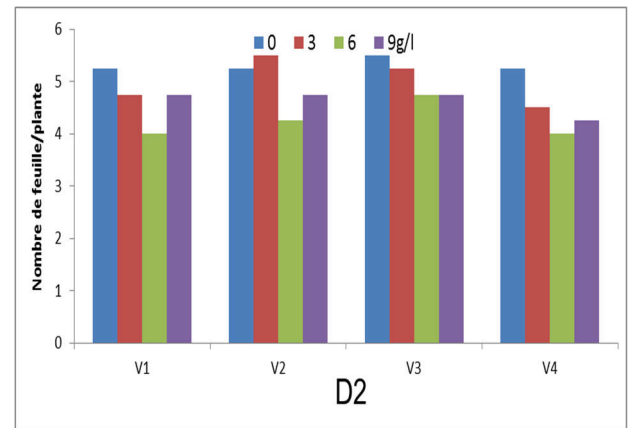


Fig. 6. Nombre de feuilles, au stade épiaison (D2), chez des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

3.1.4 LONGUEUR DE DERNIÈRE FEUILLE

L'analyse de la variation effectuée pour la longueur de dernière feuille montre que les effets de la durée de traitement et la variété sont non significatives. Cependant, l'effet de la salinité est très hautement significatif sur la longueur de la dernière feuille. Pour toutes les concentrations de NaCl, la longueur de dernière feuille a été affectée chez les quatre variétés de blé (Fig. 7 et Fig. 8). En effet, la variation par rapport au témoin, montre que le pourcentage de réduction est plus marqué chez la variété Karim (V2).

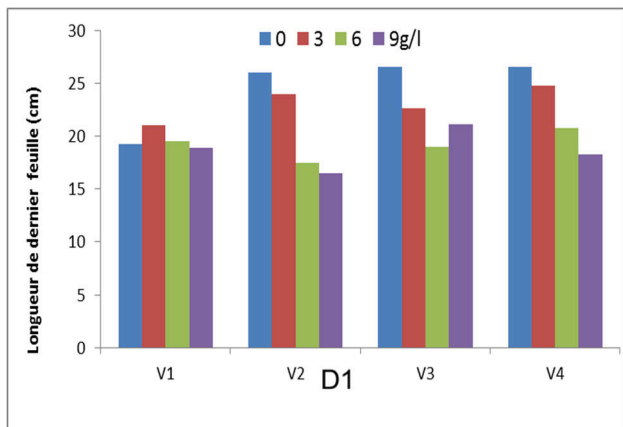


Fig. 7. Longueur (cm) de la dernière feuille, au stade montaison (D1), chez des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

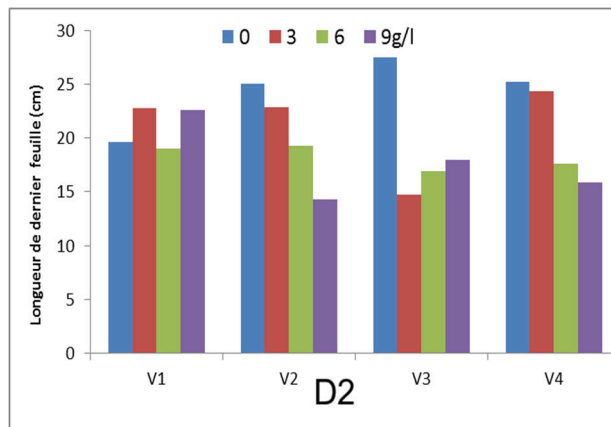


Fig. 8. Longueur (cm) de la dernière feuille, au stade épiaison (D2), chez des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

3.1.5 MASSES DE MATIÈRE (FRAICHE ET SECHE)

L'analyse de la variance montre un effet très hautement significatif pour la salinité et la durée de traitement sur la matière fraîche aérienne et racinaire et hautement significatif pour l'effet de la variété. Concernant la matière fraîche (MF), l'augmentation de la salinité affecte négativement la MF de la partie aérienne (PA) et racinaire (PR) des quatre variétés de blé dur aux stades montaison et épiaison (Fig. 9 et Fig. 10). En effet, les résultats enregistrés ont été montrés une réduction plus forte de la matière fraîche dans les deux parties au stade montaison chez les quatre variétés de blé dur.

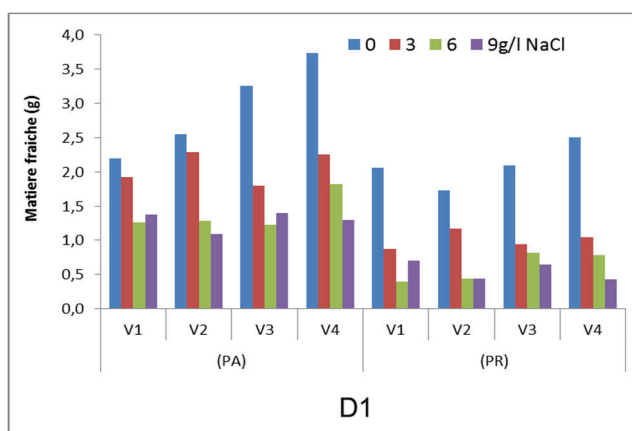


Fig. 9. Masse (g) de la matière fraîche des parties aérienne (PA) et racinaire (PR), au stade montaison (D1), chez des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

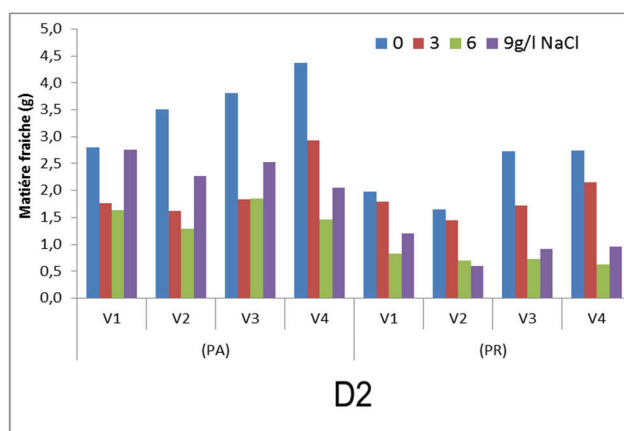


Fig. 10. Masse (g) de la matière fraîche des parties aérienne (PA) et racinaire (PR), au stade épiaison (D2), chez des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

L'analyse statistique pour la biomasse sèche (MS) montre un effet très hautement significatif de la salinité sur la matière sèche de la partie aérienne (PA) et racinaire (PR), alors que pour l'effet de la durée, les analyses ont été montrés une différence très hautement significative sur la MS de la partie aérienne et hautement significative sur la MS de la partie racinaire (PR) ; mais non significative pour l'effet de la variété dans les deux parties. Pour ce qui est de la matière sèche (MS), l'augmentation de la concentration en NaCl a provoqué une diminution de la MS (Fig. 11 et Fig. 12). D'autre part, les réductions les plus fortes ont été enregistrées dans la partie aérienne au stade montaison et dans la partie racinaire du stade épiaison chez les quatre variétés.

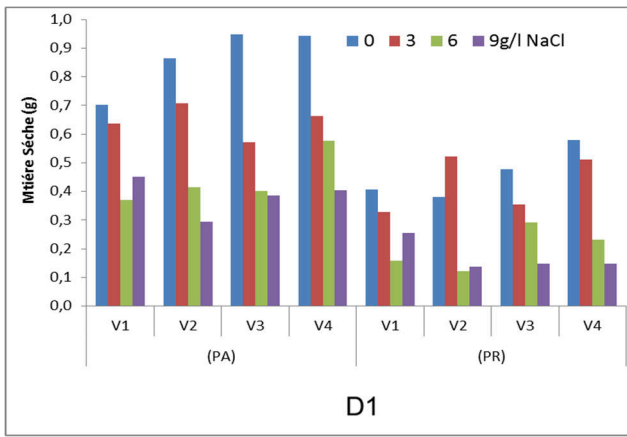


Fig. 11. Masse (g) de la matière sèche des parties aérienne (PA) et racinaire (PR), au stade montaison (D1), chez des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

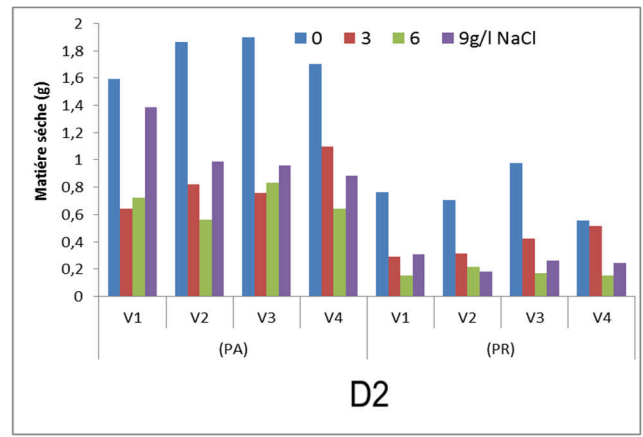


Fig. 12. Masse (g) de la matière sèche des parties aérienne (PA) et racinaire (PR), au stade épiaison (D2), chez des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

3.1.6 MASSES FRAÎCHE TOTALE

Les analyses statistiques ont été montrées un effet très hautement significatif de la salinité et de la durée de traitement et hautement significatif de la variété sur la masse fraîche totale. La masse fraîche totale a été nettement affectée négativement par la salinité de la solution d’arrosage chez les quatre variétés de blé dur (Fig.13 et 14). Ainsi, la réduction la plus forte a été enregistré au stade montaison, à 9g/l, la masse fraîche totale a été réduite de 55%, 64%, 62% et 72% au stade montaison et de 17%, 45%, 47% et 58% au stade épiaison respectivement chez Carioca (V1), Karim (V2), Tarik (V3) et Tomouh (V4).

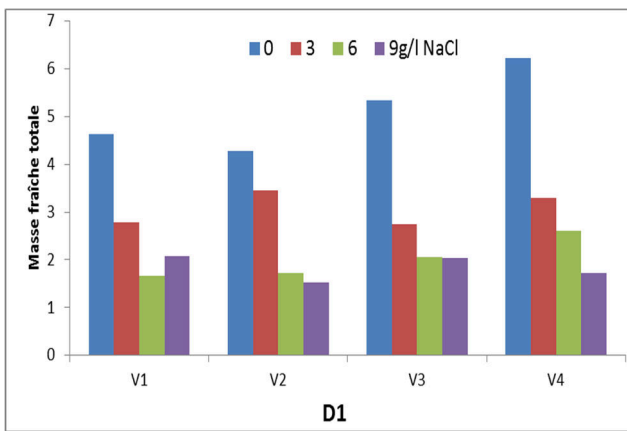


Fig. 13. Masse (g) de la matière fraîche totale au stade montaison (D1), chez des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

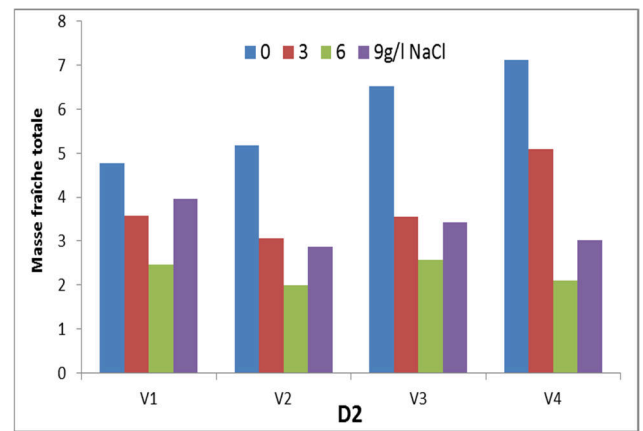


Fig. 14. Masse (g) de la matière fraîche totale au stade épiaison (D2), chez des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

3.1.7 INDICE DE SENSIBILITE RELATIVE AU SEL (I.S.R.S.) DE LA MATIÈRE FRAÎCHE

L'indice de sensibilité relative au sel (I.S.R.S.) de la matière fraîche semble être affecté différemment en fonction de la variété, des concentrations en NaCl et de type de stade (Tab. 1 et 2). A faible concentration (3g/l NaCl), la variété Tarik (V3) a révélé l’I.S.R.S le plus important (1,22 au stade montaison et 1,29 au stade épiaison), alors que les autres variétés ont présenté des indices faibles. Cependant, sous contrainte sévère (9 g/l), des valeurs supérieures ou égales à 1 ont été enregistrées chez toutes les variétés sauf la variété Carioca (V1) qui a montré l’I.S.R.S. le plus faible (0,86 au stade montaison et 0,39 au stade épiaison).

Tableau 1. *Indice de sensibilité relative au sel (I.S.R.S.) de la matière fraîche pour toutes les variétés testées sous différents niveaux de sel (0, 3, 6 et 9 g/l NaCl) au stade montaison (D1).*

| Traitements | Carioca (V1) | Karim (V2) | Tarik (V3) | Tomouh (V4) |
|-------------|--------------|------------|------------|-------------|
| 0 | - | - | - | - |
| 3 | 0,99 | 0,48 | 1,22 | 1,18 |
| 6 | 1,06 | 0,98 | 1,01 | 0,96 |
| 9g/l | 0,86 | 1,01 | 0,97 | 1,13 |

Tableau 2. *Indice de sensibilité relative au sel (I.S.R.S.) de la matière fraîche pour toutes les variétés testées sous différents niveaux de sel (0, 3, 6 et 9 g/l NaCl) au stade épiaison (D2).*

| Traitements | Carioca (V1) | Karim (V2) | Tarik (V3) | Tomouh (V4) |
|-------------|--------------|------------|------------|-------------|
| 0 | - | - | - | - |
| 3 | 0,72 | 1,15 | 1,29 | 0,81 |
| 6 | 0,79 | 1,00 | 0,99 | 1,15 |
| 9g/l | 0,39 | 1,02 | 1,08 | 1,32 |

3.1.8 MASSE SÈCHE TOTALE

La salinité a montré un effet très hautement significatif sur ce paramètre. D'autre part, un effet très hautement significatif a été décelé pour le facteur durée de traitement en faveur du stade épiaison.

Pour toutes les concentrations de NaCl, la masse sèche totale a été diminuée chez les quatre variétés de blé dur et la variation par rapport au témoin a été accentuée par la concentration de NaCl notamment au stade montaison (Fig. 15 et 16). La diminution par rapport au témoin en présence du sel a été plus faible chez la variété Carioca (V1), à 9g/l NaCl, la masse sèche totale a été réduite de 36% et de 28% respectivement au stade montaison et épiaison ; alors que les autres variétés ont été présentées des diminutions par rapport au témoin supérieures ou égales à 50%.

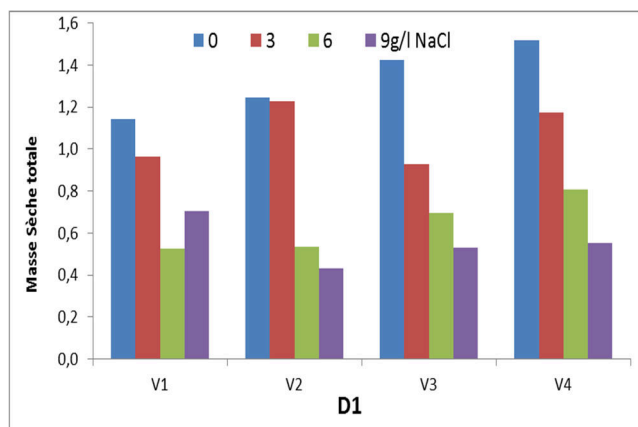


Fig. 15. Masse (g) de la matière sèche totale au stade montaison (D1), chez des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

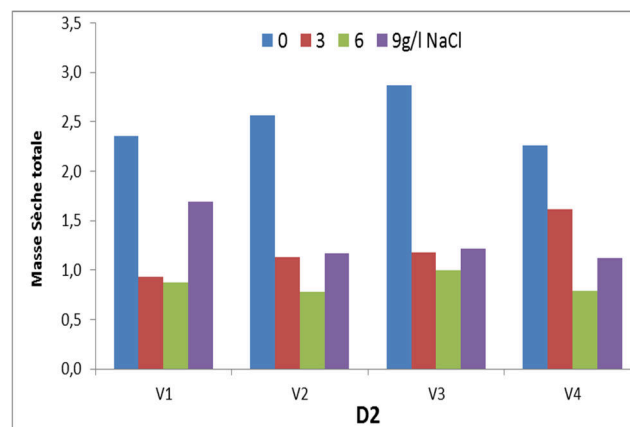


Fig. 16. Masse (g) de la matière sèche totale au stade épiaison (D2), chez des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

3.1.9 INDICE DE SENSIBILITE RELATIVE AU SEL (I.S.R.S.) DE LA MATIÈRE SÈCHE

La salinité a affecté l'indice de sensibilité relative au sel de la matière sèche (I.S.R.S.) aux stades montaison et épiaison (Tab. 3 et 4). A faible concentration (3g/l NaCl), la variété Tarik (V3) a révélé l'I.S.R.S le plus important (0,88) au stade montaison et la variété Carioca (V1)(1,77) au stade épiaison, alors que les autres variétés ont présenté des indices faibles. Cependant, sous contrainte sévère (9 g/l NaCl), des valeurs supérieures ou égales à 1 ont été enregistrées chez tous les variétés sauf la variété Carioca (V1) qui a été montré l'I.S.R.S. le plus faible (0,66 au stade montaison et 0,59 au stade épiaison).

Tableau 3. *Indice de sensibilité relative au sel (I.S.R.S.) de la matière sèche pour toutes les variétés testées sous différents niveaux de sel (0, 3, 6 et 9 g/l NaCl) au stade montaison (D1).*

| Traitements | Carioca (V1) | Karim (V2) | Tarik (V3) | Tomouh (V4) |
|-------------|--------------|------------|------------|-------------|
| 0 | - | - | - | - |
| 3 | 0,79 | 0,04 | 0,88 | 0,57 |
| 6 | 1,04 | 0,94 | 0,84 | 0,77 |
| 9g/l | 0,66 | 1,02 | 0,98 | 1,00 |

Tableau 4. *Indice de sensibilité relative au sel (I.S.R.S.) de la matière sèche pour toutes les variétés testées sous différents niveaux de sel (0, 3, 6 et 9 g/l NaCl) au stade épiaison (D2).*

| Traitements | Carioca (V1) | Karim (V2) | Tarik (V3) | Tomouh (V4) |
|-------------|--------------|------------|------------|-------------|
| 0 | - | - | - | - |
| 3 | 1,77 | 1,59 | 1,67 | 0,81 |
| 6 | 0,96 | 1,14 | 1,06 | 1,06 |
| 9g/l | 0,59 | 1,25 | 1,32 | 1,15 |

3.2 PARAMÈTRES PHYSIOLOGIQUES

3.2.1 TENEUR EN EAU (TE)

Les analyses statistiques ont montré un effet très hautement significatif de la salinité sur la TE racinaire et non significatif sur la TE foliaire. Au stade montaison, la salinité affecte légèrement la teneur foliaire en eau chez les quatre variétés de blé. En outre, au niveau des racines, la teneur en eau a été réduite chez les quatre variétés de blé par rapport au témoin (Fig.17).

Au stade épiaison, le sel entraîne une augmentation de la teneur en eau foliaire et racinaire chez les variétés Carioca (V1), Karim(V2) et Tarik (V3) et une légère diminution chez la variété Tomouh (V4) (Fig. 18).

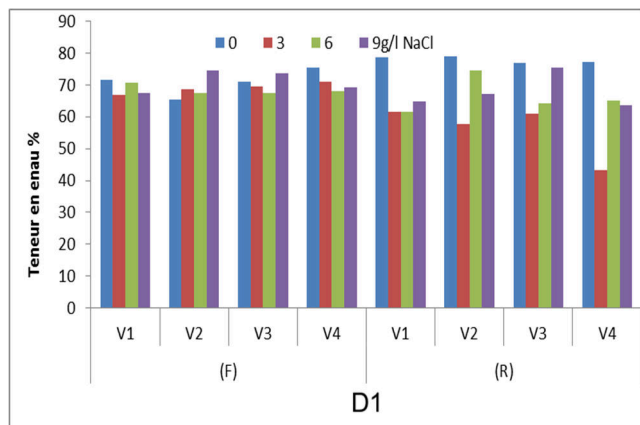


Fig. 17. *Teneur en eau (TE), au stade montaison (D1), des feuilles (F) et des racines (R) de plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.*

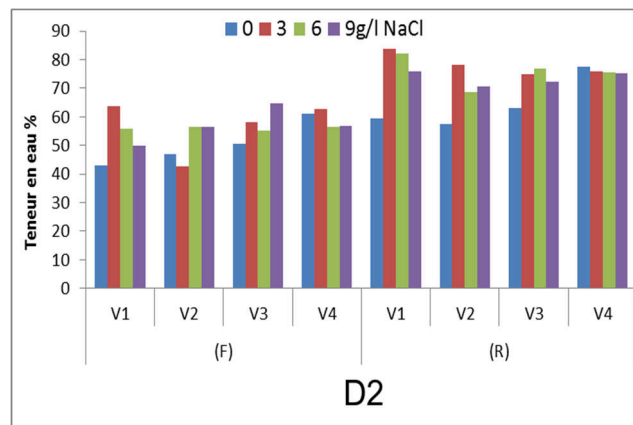


Fig. 18. *Teneur en eau (TE), au stade épiaison (D2), des feuilles (F) et des racines (R) de plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.*

3.2.2 TENEUR EN SUCRE

L'analyse de la variance, a montré un effet très hautement significatif de la salinité sur la teneur en sucre foliaire et racinaire quel que soit la variété étudiée mais non significatif pour les facteurs « variété » et « durée de traitement ». La salinité entraîne une augmentation de la teneur en sucre foliaire chez les quatre variétés durant les deux stades montaison et épiaison (Fig.19 et 20). Cependant, au stade montaison, les teneurs en sucre ont été plus faibles dans la partie racinaire au fur que les concentrations salines deviennent plus fortes (6 et 9 g/l NaCl) notamment pour les variétés Karim (V2), Tarik (V3) et Tomouh (V4), alors que la variété Carioca (V1) a enregistré des valeurs plus élevées. Toutefois, les résultats obtenus au stade épiaison, pour la partie racinaire, sont contradictoires à ceux obtenus au stade montaison.

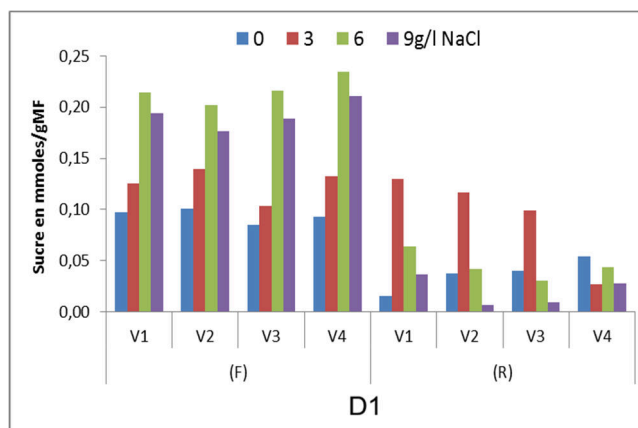


Fig. 19. Teneur en sucres solubles totaux, au stade montaison (D1), des feuilles (F) et des racines (R) de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

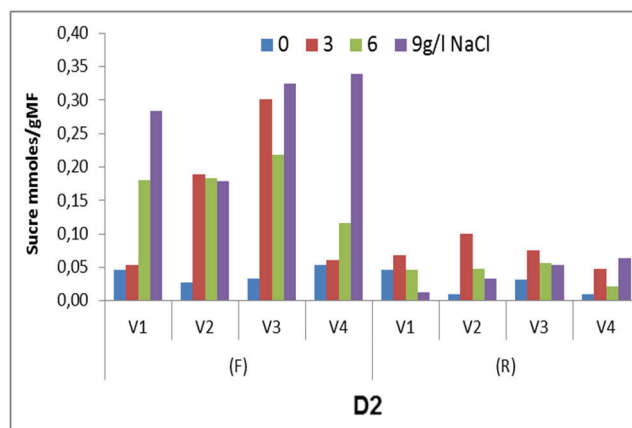


Fig. 20. Teneur en sucres solubles totaux, au stade épiaison (D2), des feuilles (F) et des racines (R) de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

3.2.3 TENEUR EN Cl⁻

La concentration de sel et la durée du traitement ont des effets très hautement significatifs sur la teneur en Cl⁻ dans les deux parties de la plante durant les deux stades de développement. L'effet du stress salin sur la teneur en Cl⁻ est variable selon la variété, la partie de la plante, le stade de croissance et la charge en sel de l'eau d'irrigation (Fig. 21 et 22). En effet, la salinité provoque une augmentation de la teneur en chlorure chez les quatre variétés étudiées dans les deux parties de la plante foliaire et racinaire. Or, les valeurs les plus élevées ont été enregistrées dans la partie foliaire des quatre variétés de blé dur. Cependant, les teneurs notées au stade épiaison (D2) ont été plus élevées par rapport au stade montaison (D1).

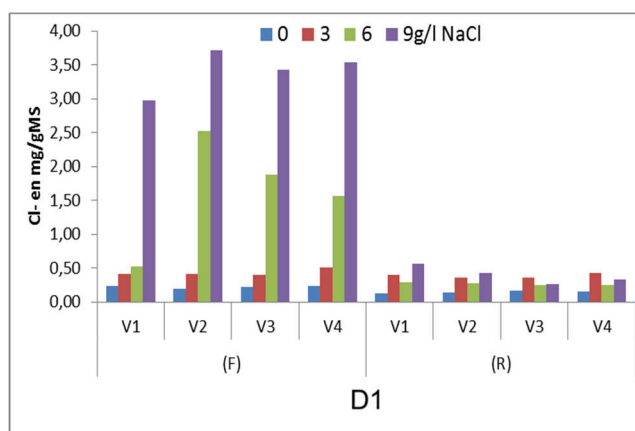


Fig. 21. Teneur en Cl⁻, au stade montaison (D1), des feuilles (F) et des racines (R) chez des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

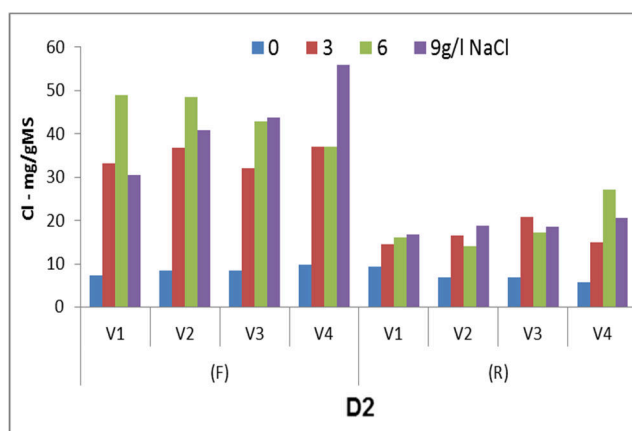


Fig. 22. Teneur en Cl⁻, au stade épiaison (D2), des feuilles (F) et des racines (R) chez des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

3.2.4 TENEUR EN Na⁺

L'analyse statistique a montré un effet très hautement significatif de NaCl sur la teneur en sodium dans les deux types d'organes. L'effet de la variété a été significatif pour les feuilles et très hautement significatif pour les racines.

Les teneurs en sodium (Na⁺) des feuilles et des racines des quatre variétés de blé sont très faibles sur le milieu témoin pendant les deux stades montaison (D1) et épiaison (D2) (Figures 23 et 24). Ces teneurs augmentent parallèlement avec la concentration saline. Ainsi, chez les quatre variétés, ce sont les feuilles qui se chargent relativement plus que les racines en Na⁺. Aussi, les teneurs les plus faibles sont enregistrées dans les racines des quatre variétés au stade épiaison (D2).

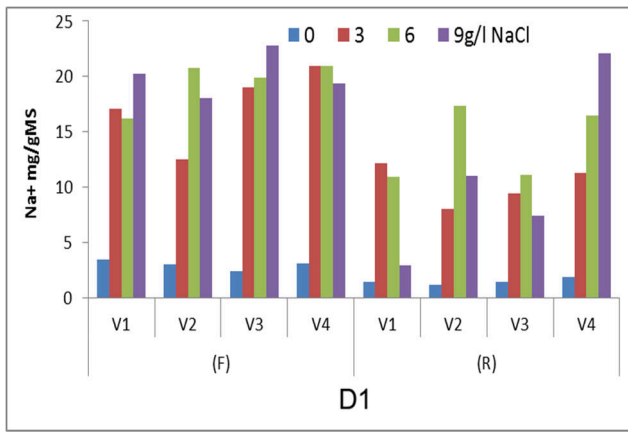


Fig. 23. Teneur en Na+, au stade montaison (D1), des feuilles (F) et des racines (R) chez des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

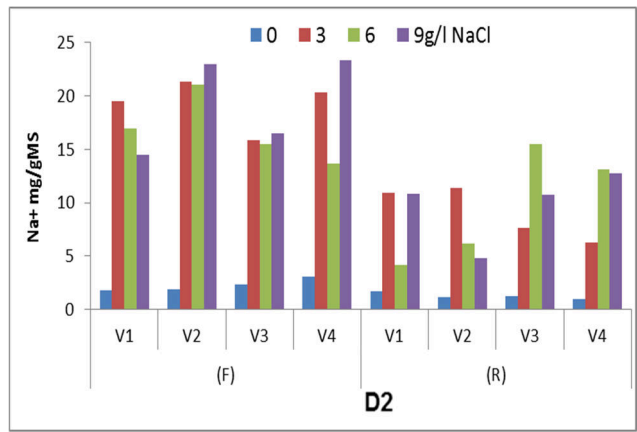


Fig. 24. Teneur en Na+, au stade épiaison (D2), des feuilles (F) et des racines (R) chez des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

3.2.5 TENEUR EN K+

L'analyse statistique a montré un effet très hautement significatif de NaCl dans les deux types d'organes, mais cet effet a été non significatif pour la variété dans les feuilles et significatif dans les racines. Les teneurs en K⁺ foliaires et racinaires ont été toujours plus élevées dans le milieu témoin (Fig.25 et 26). En effet, pour les deux organes (notamment au niveau des feuilles) et pendant les deux stades, la teneur en K⁺ chute fortement, même à faible dose de NaCl (3 g/l) chez les quatre variétés. De plus, les teneurs enregistrées dans les feuilles sont plus élevées par rapport aux racines.

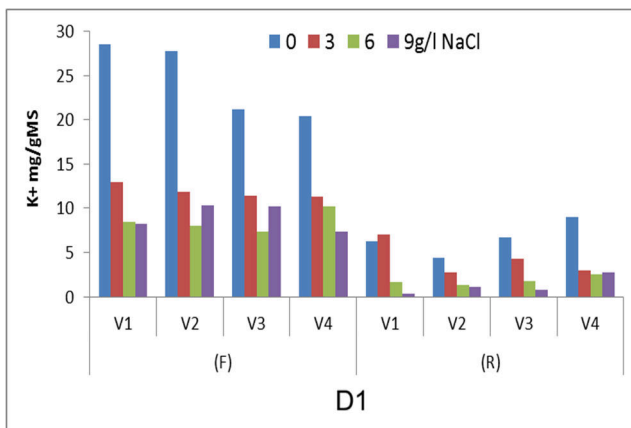


Fig. 25. Teneur en K+, au stade montaison (D1), des feuilles (F) et des racines (R) chez des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

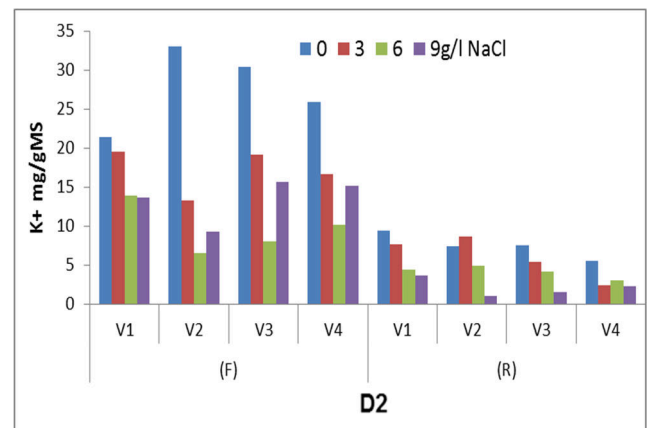


Fig. 26. Teneur en K+, au stade épiaison (D2), des feuilles (F) et des racines (R) chez des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

3.2.6 RAPPORT K+/NA+

L'analyse statistique a montré un effet très hautement significatif de la salinité sur ce paramètre dans les deux organes de la plante. D'autre part, un effet significatif a été décelé pour le facteur durée de traitement. Le rapport K⁺/Na⁺ a été nettement affecté par la salinité de la solution d'arrosage (Fig.27 et Fig.28). En outre, les valeurs de ce rapport dans les racines ont été inférieures à l'unité chez les quatre variétés de blé dur. Ce rapport K⁺/Na⁺ dans les feuilles et les racines est en faveur de Na⁺ à partir de 3 g/l NaCl.

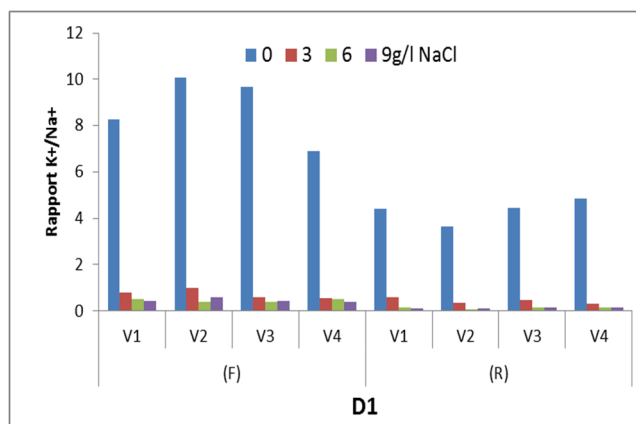


Fig. 27. Rapport K⁺/Na⁺, au stade montaison (D1), dans les feuilles (F) et les racines (R) des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

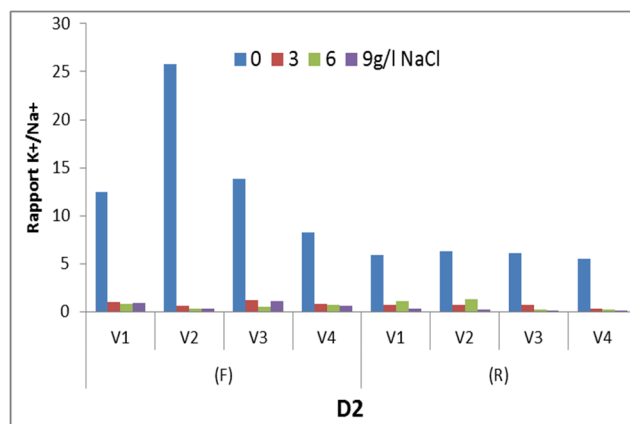


Fig. 28. Rapport K⁺/Na⁺, au stade épiaison (D2), dans les feuilles (F) et les racines (R) des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

3.3 COMPOSANTES DE RENDEMENT: NOMBRE D'ÉPIS

La salinité a eu un effet très hautement significatif sur le nombre d'épis. Un effet très hautement significatif a été décelé de plus pour le facteur variété. En l'absence de sel, les 4 variétés forment le plus grand nombre d'épis soit 14, 29, 24 et 21 épis/pot chez Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4) respectivement (Fig.29). Lorsque le stress a été de 3g/l NaCl, le nombre d'épis chute de 30%, 65%, 59% et 45% chez les variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4) respectivement. Cette baisse s'accroît avec 9 g/l NaCl chez les 4 variétés.

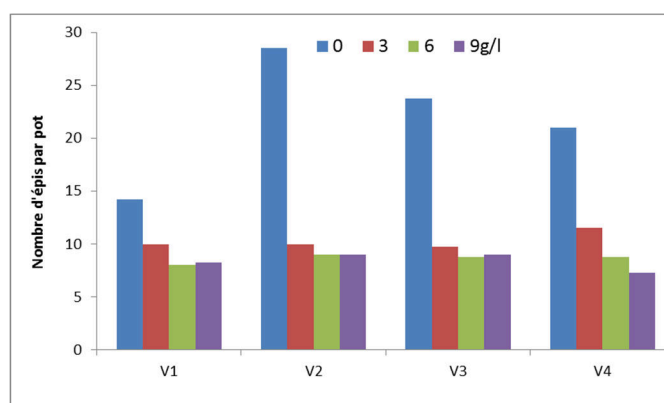


Fig. 29. Nombre d'épis par pot des plantes de blé dur, variétés Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4), arrosées avec différentes concentrations en NaCl.

3.4 ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP) ET CLASSIFICATION HIERARCHIQUE

Les composants principaux (PC1) et (PC2) expliquent respectivement 40,5% et 19,65% de l'information avec un pourcentage cumulé de 60,15% (Fig.30). Les trois concentrations salines (3, 6 et 9 g/l NaCl) sont regroupées. Ainsi, une corrélation positive entre la teneur en eau, le rapport de matière sèche, la teneur en sucre, la teneur en Cl⁻ et le nombre de feuilles est significative. Cependant, les concentrations témoins (0g/l NaCl) forment un autre groupe quelle que soit la variété et le stade de traitement, par ailleurs, une corrélation est notée entre le rapport K⁺/Na⁺, la hauteur des plantes et la longueur des feuilles

La durée de traitement (Fig.31), la durée 1 (montaison (D1)) a été regroupée sur la côté inférieur du biplot avec une corrélation positive entre la teneur en Cl⁻, le nombre de feuilles et le nombre de tiges. Toutefois, la durée 2 (épiaison (D2)) a été regroupée avec une corrélation positive entre la teneur en eau, le rapport de la matière sèche, la teneur en sucres, le rapport K⁺/Na⁺, la hauteur et la longueur de feuilles dans la même côté.

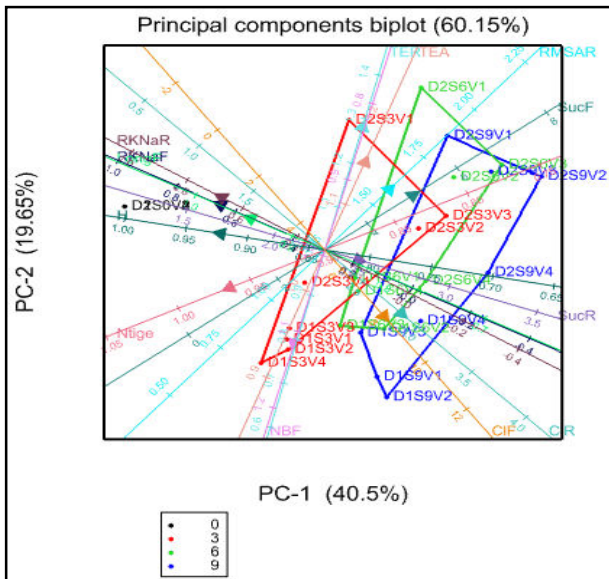


Fig. 30. Analyse des composantes principales (ACP) de différentes concentrations de NaCl (S0 :0, S3 : 3, S6 : 6 et S9 : 9g/l NaCl) pour les quatre variétés de blé dur : Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4) en deux durés de stress (D1 : montaison et D2 : épiaison).

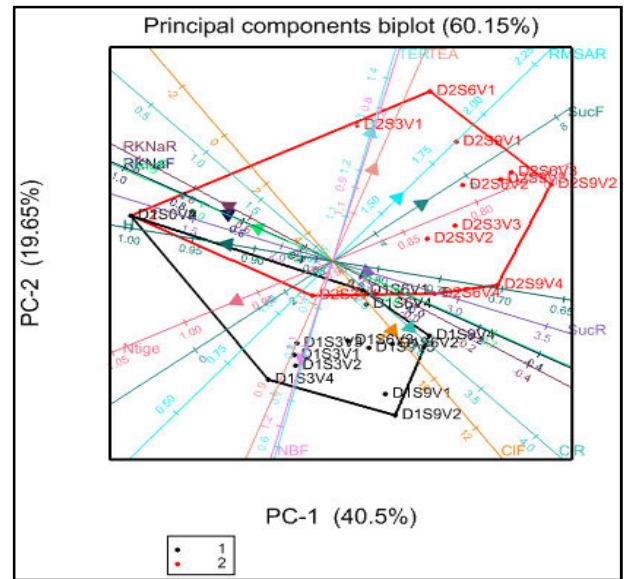


Fig. 31. Analyse des composantes principales (ACP) de deux durées de stress (montaison (D1) et épiaison (D2)) pour les quatre variétés de blé dur : Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4) dans différentes concentrations de NaCl (S0 :0, S3 : 3, S6 : 6 et S9 : 9g/l NaCl).

Une classification hiérarchique a été réalisée sur les traitements combinés à savoir concentrations salines (S), durées de stress (D) et variétés de blé dur (V) pour confirmer les groupes caractérisés par l'ACP (Fig.32). Le dendrogramme montre quatre groupes (G1, G2, G3 et G4) avec seuil de similarité de 80%. Le groupe 1 (G1) représenté par les interactions durées de stress x variétés et la concentration témoin (S0). Les deux groupes G2 et G3 sont représentés par les interactions durées de stress x variétés et les concentrations salines (S3: 3gl, S6: 6g/l et S9: 9g/l NaCl). Cependant, le groupe G4 est représenté par l'interaction durée 2 (D2 : épiaison) x concentrations salines et la variété 1 (V1 : Carioca).

Selon l'ACP de variétés (Fig.33), les quatre variétés de blé dur ont été regroupées en 3 groupes sous l'effet de concentration saline et la durée de stress. Le premier groupe représenté par la variété Carioca (V1), le deuxième groupe représenté par les variétés Karim (V2) et Tarik (V3) et le troisième groupe représenté par la variété Tomouh (V4).

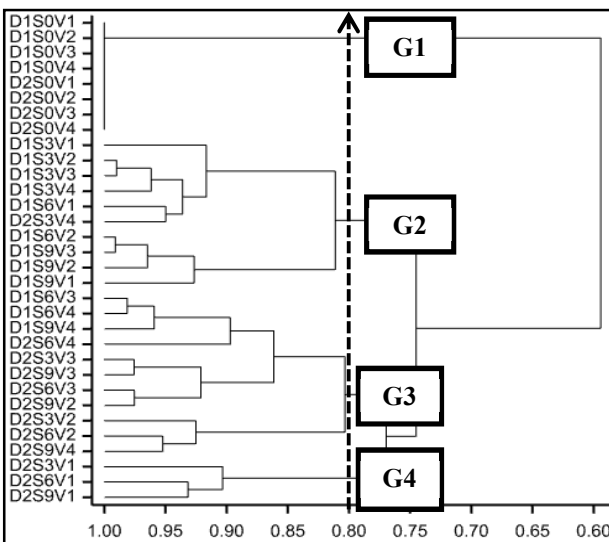


Fig. 32. Analyse de grappes hiérarchique pour l'interaction « durées x concentrations x variétés » de différentes variétés de blé dur Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4) dans différentes concentrations de NaCl (S0 :0, S3 : 3, S6 : 6 et S9 : 9g/l NaCl) en deux durés de stress (D1 : montaison et D2 : épiaison).

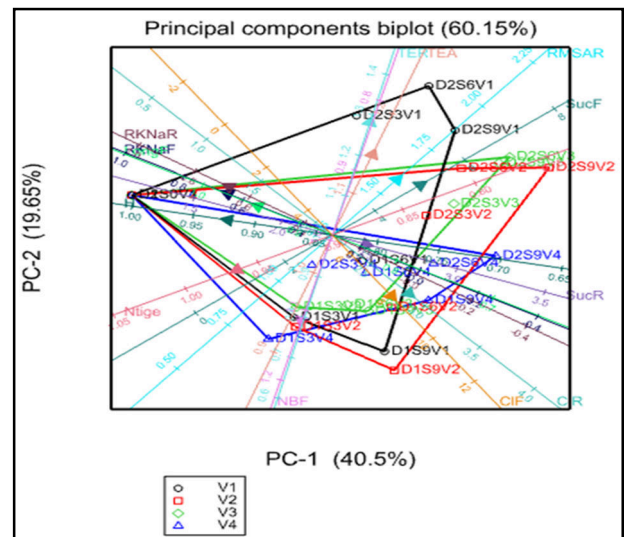


Fig. 33. Analyse des composantes principales (ACP) de différentes variétés de blé dur Carioca (V1), Karim (V2) Tarik (V3) et Tomouh (V4) dans différentes concentrations de NaCl (S0 :0, S3 : 3, S6 : 6 et S9 : 9g/l NaCl) en deux durés de stress (D1 : montaison et D2 : épiaison).

4 DISCUSSION

La salinité est l'un des stress environnementaux les plus sévères qui entraînent une perte de rendement des cultures. Les plantes ont développé différents mécanismes pour s'adapter au stress salin impliquant des changements physiologiques et biochimiques (Hasegawa et al., 2000; Widodo et al., 2009).

Dans ce travail on a traité quelques paramètres agrophysiologiques évaluant ainsi la réponse de blé dur (*Triticum durum* Desf.) face au stress salin selon deux stades de croissance à savoir le stade montaison (D1) et le stade épiaison (D2). Les paramètres de croissance (la hauteur de la plante, le nombre de tige, le nombre des feuilles, la longueur des feuilles et la biomasse) ont été affectés par la salinité à partir de 3g/l NaCl, l'effet de la salinité a été significatif pour les quatre variétés de blé dur durant les deux stades de croissance. Ces résultats sont en concordance avec ceux réalisés sur le blé dur par Gheraibia et al. (2016), et ceux obtenus par Naceur et al. (2001) sur quelques variétés maghrébines de blé et ceux montrés par Rochdi et al. (2005) sur quelques porte-greffes des agrumes.

Plusieurs auteurs ont noté que la réduction de l'accroissement des tiges serait une stratégie d'adaptation à la contrainte saline plus qu'un simple effet de la salinité (Ayed et al., 2016 et Ben Naceur, 2001). Des travaux ont noté que l'utilisation des concentrations plus élevées de chlorure de sodium provoque la réduction de la longueur des plantes et le nombre de tige par plante, cas de *Triticum durum* Desf. (Ayed et al., 2016) et cas de *Brassicac ampestris* L. (Memon et al., 2010). D'une manière générale, la diminution remarquée sur la longueur de la tige, suite à un traitement salin, pourrait être due à l'effet négatif du sel sur le taux de photosynthèse, les changements dans l'activité de l'enzyme (qui affecte ensuite la synthèse de protéines), ainsi que la diminution du niveau des glucides et des hormones de croissance, qui peuvent tous conduire à une inhibition de la croissance (Mazher et al., 2007).

Plusieurs études confirment l'effet négatif de la salinité sur le nombre de feuilles de plantes chez plusieurs espèces Gama et al. (2007) avec leur étude sur les haricots (*Phaseolus vulgaris* L.), Karen et al. (2002) sur *Cirer arietinum* L. et Raul et al. (2003) sur le haricot teprary (*Phaseolus acutifolius* L.) et le haricot sauvage (*Phaseolus filiformis* L.).

De même, certains travaux affirment l'effet négatif de la salinité sur la longueur de feuilles Gheraibia et al. (2016) ont travaillé sur deux variétés de blé dur (*Triticum durum* L.), Netondo et al., (2004) sur le sorgho commun (*Sorghum bicolor*) Gulzar et al. (2005) sur *Sporobolus ioclados*.

La diminution du nombre de feuilles peut être due à l'accumulation de chlorure de sodium dans les parois cellulaires et le cytoplasme des feuilles âgées par manque d'efficacité de séquestration vacuolaire, ce qui conduit finalement à l'intoxication des cellules et leur mort rapide et donc leur abscission (Munns, 2002).

L'effet négatif du stress salin sur le poids frais et sec des plantes est rapporté dans de nombreux travaux tels que ceux de Rui et al. (2009) sur *Bruguiera gymnorhiza* L., et ceux de Memon et al. (2010) sur *Brassica campestris* L. Selon Samira et al. (2011) une concentration de 6g/l NaCl induit une diminution significative de l'ordre de 42,2% de la production moyenne de biomasse sèche aérienne par plante de variétés de piments. Toutefois, d'autres études indiquent des résultats contraires, montrant l'effet positif du stress salin sur le poids frais et sec cas de la laitue (*Lactuca sativa* L.) (Andriolo et al. 2005), de la betterave fourragère (*Beta vulgaris* L.) (Niaz et al. (2005) et de la vesce commune (*Vicia sativa* L.) par (Orak et Ates 2005). L'augmentation du poids frais du système aérien peut être due à la capacité de la plante à augmenter la taille de ses vacuoles, permettant ainsi la collecte d'une grande quantité d'eau, ce qui dissout les ions salins accumulés et conduit à l'augmentation subséquente du poids frais (Munns, 2002).

L'indice de sensibilité relative au sel (I.S.R.S) de la biomasse a été mesuré pour déterminer l'effet du stress salin sur les quatre variétés de blé. En effet, sous contrainte sévère (9 g/l NaCl), des valeurs supérieures ou égales à 1 ont été enregistrées chez toutes les variétés à l'exception de la variété Carioca (V1) qui a été montrée l'I.S.R.S. le plus faible dans les deux stades de croissance (montaison (D1) et épiaison (D2)). Cet indice a été également utilisé par plusieurs auteurs pour déterminer la réponse des variétés de blé dur (Ayed et al., 2016), d'haricot (Mainassara et al., 2009) et du tabac (Zaghdoud et al., 2011) à la contrainte saline. Selon Ayed et al. (2016), le génotype de blé dur qui a été montré l'indice de sensibilité relative au sel le plus faible montrant une meilleure adaptation à la contrainte saline en comparaison avec les autres génotypes.

Les résultats montrent également que l'augmentation du traitement salin s'accompagne d'une réponse physiologique des plantes, conduisant à une augmentation de la teneur en eau racinaire, notamment au stade épiaison (D2). Ainsi, la salinité conduit à l'augmentation de la teneur en sucre foliaire chez les quatre variétés de blé dur et les valeurs enregistrées dans la partie racinaire sont plus faibles que la partie foliaire. Selon Djahra et al. (2015) l'absorption de l'eau est maintenue à un niveau suffisant pour éviter la déshydratation des tissus de la plante et aussi pour établir le phénomène de succulence et pouvoir diluer le plus d'osmolytes possibles. D'après Qurashiet Sabri (2013), l'accumulation de sucres solubles et d'autres osmolytes dans le pois chiche a amélioré la croissance des plantes et a contribué à maintenir les pigments photosynthétiques sous le

stress salin. Les sucres solubles ont un double rôle chez les plantes, ils participent aux événements métaboliques et agissent comme signaux moléculaires pour la régulation des différents gènes, en particulier ceux qui sont impliqués dans la photosynthèse, le métabolisme du saccharose et de la synthèse d'osmolyte (Rosa et al., 2009).

Les analyses minérales montrent que les quatre variétés de blé dur cultivées en présence de NaCl sont fortement envahies par les ions Na^+ et Cl^- dont les teneurs augmentent en fonction de la concentration du sel. Par contre, les teneurs en K^+ diminuent en fonction de la concentration de NaCl pour atteindre les valeurs les plus faibles aux plus fortes concentrations (6 et 9 g/l NaCl). Ces résultats sont en concordance avec ceux trouvés par Mani et Hannachi (2015) et Sultana et al. (2001). Dans notre résultat, les teneurs en Na^+ dans la partie foliaire a été plus élevées que dans la partie racinaire. Cette caractéristique ionique suppose que les plantes de blé dur se comportent comme des « includers ». Le stress salin a augmenté les niveaux de Na^+ et de Cl^- dans toutes les parties de la goyave, en particulier dans les feuilles, ce qui entraîne une réduction de la croissance (Ferreira et al., 2001).

D'après Cuin et al. (2008) les variétés de blé et d'orge tolérantes au stress salin accumulent plus d'ion potassium (K^+) dans le système racinaire que les variétés sensibles. Cependant, Al-Karaki et al. (2009) et Hamrouni et al. (2011) ont constaté que les génotypes tolérants de poivrons seraient capables d'accumuler de grandes quantités de potassium (K^+) particulièrement dans les parties aériennes par rapport aux cultivars sensibles. Certains auteurs suggèrent que l'absorption de NaCl contrecarre l'absorption d'autres ions et nutriments, essentiellement le cation K^+ , ce qui conduit à une déficience potassique (Parida et Das, 2005).

D'après nos résultats, le traitement salin affecte négativement le rapport K^+/Na^+ dans les deux parties de la plante chez les quatre variétés de blé. Ainsi, les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans la partie foliaire. De Lacerda et al., 2005 ont signalé que les plantes tolérantes maintiennent un rapport K^+/Na^+ élevé dans leurs parties aériennes suite à une discrimination de l'absorption de K^+ et Na^+ au niveau des racines ainsi que de leur transport dans les parties aériennes.

Les résultats montrent que la salinité a un effet fortement dépressif sur le nombre d'épis par pot ce qui répercute sur le rendement chez les quatre variétés de blé dur. Ces résultats sont en accord avec ceux de Saadollah et al. (2005) qui ont prouvé que les paramètres de rendement sont affectés négativement chez le blé dur par la salinité.

Les corrélations entre les paramètres sous l'effet de stress salin, montrent que la hauteur de la plante, la longueur des feuilles et la biomasse sont positivement corrélés avec la teneur en K^+ , expliquant ainsi l'importance de potassium dans la croissance et par conséquent la production de la biomasse chez le blé dur. Cependant, une corrélation négative entre la teneur en Na^+ et la teneur en K^+ montre la compétition entre le sodium et le potassium (Garcia-Sanchez et al., 2002 ; Duran et al., 2004 et Hamrouni et al., 2011). Ainsi, les tests de corrélations montrent que les teneurs en Na^+ et Cl^- sont corrélés négativement avec la hauteur de la plante, la longueur des feuilles et la biomasse chez les quatre variétés de blé dur renforcent l'effet négatif des ions Na^+ et Cl^- sur les paramètres de croissance chez le blé dur dans les conditions de stress salin. Aussi, la teneur en glucides solubles est corrélée positivement avec les teneurs en Cl^- et Na^+ et négativement avec la teneur en K^+ ce qui traduirait une déficience d'utilisation et la conséquence de l'arrêt de croissance et serait lui aussi l'expression pathologique de dommages engendrés par la concentration élevée en NaCl dans le milieu de culture (Rochdi et al., 2003).

L'analyse des composantes principales (ACP) est la méthode multivariée la plus fréquemment utilisée pour classer les échantillons présentant un statut biologique, une origine ou une qualité diversifiés (Liu et al., 2010; Low et al., 2012; Kim et al., 2013). Ainsi, l'ACP de la durée de traitement, au stade montaison (D1), a montré une corrélation positive entre la teneur foliaire et racinaire en Cl^- , le nombre de feuilles et le nombre de tiges ce qui suggère que on peut utiliser ces paramètres pour évaluer la réponse de blé dur (*Triticum durum* Desf.) face au stress salin au stade montaison. Cependant, au stade épiaison (D2), l'ACP a montré une corrélation positive entre la teneur en eau (foliaire et racinaire), le rapport (Partie aérien/partie racinaire) de la matière sèche, la teneur foliaire et racinaire en sucre, le rapport foliaire et racinaire en (K^+/Na^+), la hauteur de plantes et la longueur de feuilles, ce qui suggère ainsi l'importance d'utiliser ces paramètres pour évaluer la réponse de blé dur (*Triticum durum* Desf.) face au stress salin au ce stade.

5 CONCLUSION

Aux stades montaison et épiaison des quatre variétés de blé dur, les résultats de l'étude ont permis de rendre compte des différences variétales vis-à-vis de la salinité. En effet, la variété Carioca (V1) est plus tolérante au sel que les autres variétés. Cette tolérance se manifeste par une diminution plus faible dans la biomasse fraîche et sèche, de la teneur en K^+ et du nombre d'épi. Aussi, cette variété a été caractérisée par un indice de sensibilité relative au sel (I.S.R.S) plus faible et une faible accumulation de Na^+ et Cl^- notamment à des concentrations plus élevées (6 et 9 g/l NaCl). Ainsi, l'analyse des composantes principales (ACP) et la classification hiérarchique, ont permis de classer les quatre variétés de blé dur en trois groupes : groupe des variétés les plus tolérantes représentées par la variété Carioca (V1), groupe des variétés moyennement tolérantes représenté par Karim (V2) et Tarik (V3) et groupe de variétés sensibles représenté par Tomouh (V4). Aussi, l'ACP nous a permis

de choisir parmi les critères étudiés, ceux qui indiqueraient le mieux la tolérance du blé dur à la salinité selon deux stades de croissance à savoir le stade montaison et le stade épiaison.

REFERENCES

- [1] Alaoui M.M., Jourmi L.E., Ouarzane A., Lazar S., Antri S.E., Zahouily M., Hmyene A., 2013. Effet du stress salin sur la germination et la croissance de six variétés marocaines de blé. *J. Mater. Environ. Sci.* 4 (6) (2013) 997-1004.
- [2] Al-Karaki, G., Al-Ajmi, A., Othman, Y., 2009. Response of soilless grown sweet pepper cultivars to salinity. *Acta Hort.* 807, 227–231.
- [3] Andriolo J.L., Luz G.L., Witter M.H., Godoi R.S., Barros G.T. et Bortolotto O.C., 2005. Growth and yield of lettuce plants under salinity. *Hort. Bras.* 23: 931-934.
- [4] Asgaria H.R., Cornelisb W., Van Dammec P., 2012. Salt stress effect on wheat (*Triticum aestivum* L.) growth and leaf ion concentrations. *International Journal of Plant Production* (2): 195- 208.
- [5] Ayed S., Othmani A., Beji S., Amara H., 2016. Criblage de quelques génotypes de blé dur (*Triticum Durum* Desf.) sous un stress salin en culture de pot. *European Scientific Journal*, vol.12, No.9 : pp 313- 325.
- [6] Bahrani A. et Hagh Joo M., 2012. Response of Some Wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes to salinity at germination and early seedling growth stages. *World Appl. Sci. J.* 16(4) : 599- 609.
- [7] Barrs H., 1968. Determination of water deficit in plant tissues. In: *Water deficit and plant growth*. New York, USA: Academic Press, 235-368.
- [8] Ben Naceur M., Rahmoun C., Sdiri H., Medahi M. et Selmi M., 2001. Effet du stress salin sur la germination, la croissance et la production de grains de blé. *Sécheresse*, 12 (3), pp. 167-174.
- [9] Camara B., Faye E., Toure M.A. et Ngom D., 2015. Etude sous serre du comportement de *Gossypium hirsutum* L. face au stress salin (Sénégal) *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 9(1): 259-269.
- [10] Charmet, G., 2011. Wheat domestication: lessons for the future. *C. R. Biol.* 334, 212–220.
- [11] Cheraghi S.A.M., 2004. Institutional and scientific profiles of organizations working on saline agriculture in Iran. In *Prospects of Saline Agriculture in the Arabian Peninsula: Proceedings of the International Seminar on Prospects of Saline Agriculture in the GCC Countries*. eds. Taha, F.K.; Ismail, S.; Jaradat, A. 18-20 March 2001, Dubai, United Arab Emirates, pp. 399-412.
- [12] Clarke J.M. et Mc-Caig T.N., 1982. Excised-leaf water retention capability as an indicator of drought resistance of *Triticum* genotypes. *Can. J. Plant Science.* 62: 571-578.
- [13] Cuin T. A., Betts S. A., Chalmandrier R. et Shabala S., 2008. A root's ability to retain K⁺ correlates with salt tolerance in wheat. *J. Exp. Bot.* 59, 2697–2706
- [14] De Lacerda C. F., Cambraia J., Oliva M. A. et Ruiz H. A., 2005. Changes in growth and in solute concentrations in sorghum leaves and roots during salt stress recovery. *Environmental and Experimental Botany* 54, 69–76.
- [15] Debbarh A., Badraoui M., 2002. Irrigation et environnement au Maroc: situation actuelle et perspectives, Actes de l'atelier du PCSI, 28-29 mai 2002, Montpellier, France. CEMAGREF, CIRAD, IRD, Cédérom du CIRAD.
- [16] Dehdari A., Rezai A., Maibody S.A.M., 2007. Genetic control of salt tolerance in wheat plants using generation means and variances analysis. *J. Sci. and Technol. Agric. and Natur. Resour.* 11, 40-49.
- [17] Dixon J., Heimsath A. et Amundson R., 2009. The critical role of climate and saprolite weathering in landscape evolution: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 34, p. 1507-1521.
- [18] Djahra A. B., Benmakhlouf Z., Benkherara S., Benkaddour M., Bordjiba O., 2015. Effet du stress salin sur la teneur en eau et certains osmolytes chez le blé dur *triticum durum* var kebir pulvérisé par une phytohormone synthétisée: benzyl-amino-purine (BAP). *Algerian journal of arid environment*, vol. 5, n° 2 : 71-81
- [19] Dubois M., Gilles KA., Hemilton JK., Rebers PA. et Smith F., 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Ann. Chem.* 28, 350-356.
- [20] Duran V.H., Martinez-Raya A., Aguilar J. & Franco D., 2004. Impact of salinity on macro- and micronutrient uptake in mango (*Mangifera indica* L. cv. 'Osteen') with different rootstocks. *Span. J. Agric. Res.*, 2, 121-133.
- [21] FAO. 2015. L'état de l'insécurité alimentaire dans le monde. Objectifs internationaux de réduction de la faim: des progrès inégaux. Rome, FAO.
- [22] Ferreira A., O'Byrne C. P., Boor K. J., 2001. Role of σ B in heat, ethanol, acid, and oxidative stress resistance and during carbon starvation in *Listeria monocytogenes*. *Appl. Environ. Microbiol.* 67, 4454–4457.
- [23] Fisher R.A. et Maurer R., 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Aust. J. Agric. Res.*, 29, 897-912.
- [24] Gama P.B.S., Inanaga S., Tanaka K., et Nakazawa R., 2007. Physiological response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings to salinity stress. *Afr. J. Biotechnol.* 6 (2), 79–88.

- [25] Gama, P.B.S., Inanaga, S., Tanaka, K., Nakazawa, R., 2007. Physiological response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings to salinity stress. *Afr. J. Biotechnol.* 6 (2), 79–88.
- [26] Garcia-Sanchez F., Jifon J.L., Carvajal M. & Syvertsen J.P., 2002. Gas exchange, chlorophyll and nutrient contents in relation to Na⁺ and Cl⁻ accumulation in 'Sunburst' mandarin grafted on different rootstocks. *Plant Sci.*, 162, 705-712.
- [27] Gheraibia H., Souiki L., Bennoua S. et Djebar M. R., 2016. Comparative Study of the Biochemical and Physiological Mechanisms of Two Varieties of Durum Wheat (*Triticum durum* L.) Subject to Salt Stress. *Indian Journal of Science and Technology*, Vol 9(7), DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i7/84670
- [28] Gulzar S., Ajmal Khan M., Ungar I.A. et Liu X., 2005. Influence of salinity on growth and osmotic relations of *Sporobolus loclados*. *Pak. J. Bot.*, 37(1): 119-129.
- [29] Ha E., Ikhajagba B., Bamidele J.F. et Ogic-odia E., 2008. Salinity effects on young healthy seedling of *kyllingia peruviana* collected from escravos, Delta state. *Global J. Environ. Res.* 2 (2), 74–88.
- [30] Hamrouni L., Hanana M., Abdely C. et Ghorbel A., 2011. Exclusion du chlorure et inclusion du sodium : deux mécanismes concomitants de tolérance à la salinité chez la vigne sauvage *vitis vinifera* subsp. *sylvestris* (var. 'sejnène') *Bitechnol. agronom. Soc. Environ.* 15 (3), 387-400.
- [31] Hasegawa P.M., Bressan R.A., Zhu J.K. et Bohnert H.J., 2000. Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 51:463–499.
- [31] Houshmand S., Arzani A., Maibody S. A. M., Mohammad F., 2005. Evaluation of salt-tolerant genotypes of durum wheat derived from in vitro and field experiments. *Field Crops Research*, 91: 345–354.
- [32] Ibn Maaouia-Houimli S., Denden M., Dridi-Mouhanded B. et Ben mansour-gueddes S., 2011, Caractéristiques de la croissance et de la production en fruits chez trois variétés de piment (*Capsicum annum* L.) sous stress salin. *TROPICULTURA*, 2011, 29, 2, 75-81
- [33] Karen W., Anthony R.Y., Timothy J.F., 2002. Effects of salinity and ozone, individually and in combination on growth and ion contents of two chickpea (*Cicer aritimum* L.) varieties. *Environ. Pollut.* 120 (2), 397–403.
- [34] Kim J.K., Park S.-Y., Lim S.-H., Yeo Y., Cho H.S. et Ha S.H., 2013. Comparative metabolic profiling of pigmented rice (*Oryza sativa* L.) cultivars reveals primary metabolites are correlated with secondary metabolites. *J. Cereal Sci.* 57, 14–20.
- [35] Liu Z.-Y., Shi J.-J., Zhang L.-W. et Huang J.-F., 2010. Discrimination of rice panicles by hyperspectral reflectance data based on principal component analysis and support vector classification. *J. Zhejiang Univ. Sci. B.* 11, 71–78.
- [36] Low M., Deckmyn G., Op de Beeck M., Blumenrother M.C., Osswald W., Alexou M., Jehnes S., Haberer K., Rennenberg H., Herbinger K., Habererle K.H., Bahnweg G., Hanke D., Wieser G., Ceulemans R., Matyssek R., Tausz M., 2012. Multivariate analysis of physiological parameters reveals a consistent O₃ response pattern in leaves of adult European beech (*Fagus sylvatica*). *New Phytol.* 196, 162–172.
- [37] Mainassara Z, Sifi B., L' taief B., El aouni M. H., 2009. Paramètres agronomiques liés à la tolérance au sel chez le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* (13) : 113-119
- [38] Mani F. et Hannachi C., 2015. Effet du stress salin sur le comportement physiologique du piment de Cayenne (*Capsicum frutescens*) *Journal of new sciences, Agriculture and Biotechnology*, 18(1), 639-647
- [39] MAPM, 2012. Situation de l'agriculture Marocaine (Maroc: Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime). <http://www.agriculture.gov.ma/pages/publications/situation-de-lagriculture-marocaine-n%C2%B010>
- [40] Mazher A.M.A., El-Quesni E.M.F., Farahat M.M., 2007. Responses of ornamental and woody trees to salinity. *World J. Agric. Sci.* 3 (3), 386–395.
- [41] Memon S.A., Hou X., Wang L.J., 2010. Morphological analysis of salt stress response of pak Choi. *EJEAFChE* 9 (1), 248–254.
- [42] Movahedi N., Paillot G. et Neveu A., 2009. Le monde manquera-t-il de terres pour nourrir les hommes du xxième siècle? Is there enough land to feed the world in the 21st century? *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, vol. 95, no3, pp. 75-80
- [43] Munns R., 2002. Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell Environ.*, 25: 239–250.
- [44] Netondo G.W., Onyango J.C., Beck E., 2004. Crop physiology and metabolism Sorghum and salinity II – gas exchange and chlorophyll fluorescence of sorghum under salt stress. *Crop Sci.* 44 (3), 806–811.
- [45] Niaz B.H., Athar M., Salim M. et Rozema J., 2005. Growth and ionic relations of fodder beet and sea beet under saline. *CEERS*, 2 (2), pp. 113-120
- [46] Orak A. et Ates E., 2005. Resistance of salinity stress and available water levels at the seedling stage of the common vetch (*Vicia sativa* L.). *Plant Soil Environ.*, 51 (2), pp. 51-56
- [47] Parida A.K. et Das A.B., 2005. Salt tolerance and salinity effect on plants: a review. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 60: 324–349.
- [48] Pitman M.G. et Läuchli A.. 2002. Global impact of salinity and agricultural ecosystems. In: *Salinity: Environment – Plants – Molecules*, A. Läuchli and U. Lüttge (Eds.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 3–20.
- [49] Qurashi A.W. et Sabri A.N., 2013. Osmolyte Accumulation in Moderately Halophilic Bacteria Improves Salt Tolerance of Chickpea. *Pakistan Journal of Botany* 45(3) 1011-1016.
- [50] Radhouane L., 2008. Effet du stress salin sur la germination, la croissance et la production en grains chez quelques écotypes de mil (*Pennisetum glaucum* L. R. Br.) autochtones de Tunisie. *Comptes Rendus Biologies*, 331(4): 278- 286.

- [51] Raul L., Andres O., Armado L., Bernardo M. et Enrique T., 2003. Response to salinity of three grain legumes for potential cultivation in arid areas (plant nutrition). *Soil Sci. Plant Nutr.* 49 (3), 329–336.
- [52] Rochdi A., El Yacoubi H. et Rachidai A., 2003. Comportement vis-à-vis de la salinité de calcs de porte-greffes d'agrumes *Citrus aurantium*, *Citrange troyer* et *Poncirus trifoliata*: évaluation de critères certifiant la réponse des agrumes au stress salin. *Agronomie*, 23: 643-649.
- [53] 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.* P : 66.
- [54] Rosa M., Prado C., Podazza G., Interdonato R., González J. A., Hilal M. et Prado F.E., 2009. Soluble sugars, *Plant Signaling & Behavior*, 4:5, 388-393.
- [55] Rui L., Wei S., Mu-xiang C., Cheng-jun J., Min W. et Bo-ping Y., 2009. Leaf anatomical changes of *Burguiera gymnorrhiza* seedlings under salt stress. *J. Trop. Subtrop. Bot.* 17 (2), 169–175.
- [56] Sangeeta Y., Irfan M., Aqil A. et Shamsul H., 2011. Causes of salinity and plant manifestations to salt stress: A review. *J. Environ. Biol.*, 32: 667-685.
- [57] Shiferaw B., Smale M., Braun H.J., Duveiller E., Reynolds M. et Muricho G., 2013. Crops that feed the world 10. Past successes and future challenges to the role played by wheat in global food security *Food Secur.*, 5, pp. 291-317
- [58] Widodo J.H.P., Patterson J.H., Newbiggin E., Tester M., Bacic A. et Roessner U.. 2009. Metabolic responses to salt stress of barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars, Sahara and Clipper, which differ in salinity tolerance. *Journal of Experimental Botany* 60:4089–4103.
- [59] Yilmaz H., Kina A., 2008. The influence of NaCl salinity on some vegetative and chemical changes of strawberries (*Fragaria x ananassa* L.). *Afr. J. Biotechnol.* 7 (18), 3299–3305.
- [60] Zaghdoud C., Debouba M., Maârroufi-Dguimi H., Gouia H., 2011. Comportement physiologique de deux espèces de tabac au stress salin '*Nicotiana tabacum*' et '*Nicotiana rustica*'. *Revue des Régions Arides* (25): 3-14.
- [61] Zhao G.Q., Ma B.L. et Ren C.z., 2007. Growth, gas exchange, chlorophyll fluorescence and ion content of naked oat in response to salinity. *Crop Sci.* 47 (1), 123–131.