Effet du stress salin sur des paramètres physiologiques et agronomiques de différentes variétés de carthame (*Carthamus tinctorius* L.)

Zraibi L[1]., Nabloussi A[2].*, Merimi J[1]., El Amrani A[1]., Kajeiou M[1]., Khalid A[1]. et Serghini Caid H[1].

1: Laboratoire des plantes et biologie des microorganisme, Faculté des Sciences, Université Mohamed Premier, B.P. 717, Oujda 60.000, Maroc.
2: INRA, Centre régional de la recherche agronomique de Meknès, B.P. 578, Meknès 50.000, Maroc.

*: Auteur de correspondance: abdelghani.nabloussi@gmail.com

Résumé

La présente étude a pour objectif d'évaluer l'influence du stress salin (0,05M et 0,1M de NaCl) sur quatre variétés de Carthame: Cartafri, Cartamar, Sharda et Rancho. L'évaluation a concerné plusieurs caractères morphologiques, physiologiques et agronomiques. Les résultats obtenus ont montré que le stress salin appliqué a affecté la majorité des paramètres étudiés. A cet effet, la présence de NaCl a entraîné une faible diminution de la croissance des plantules (diminution de la hauteur des plantes et de la surface foliaire). Au niveau foliaire, l'effet du sel s'est traduit par une accumulation des teneurs en sucres solubles et en proline, une baisse de la teneur en pigments chlorophylliens et une accumulation du Malondialdehyde (MAD). De même, il y a eu diminution du rendement photosynthétique et du nombre de graines par plante, notamment à 0,1M de NaCl. L'existence de corrélations positives entre la réduction de l'activité photosynthétique, d'une part, et la diminution de la teneur en chlorophylle et du nombre de graines, d'autre part, indique que la réduction du nombre de graines sous l'effet du stress salin serait une conséquence de la réduction de l'activité photosynthétique, expliquée par une diminution de la teneur en chlorophylle. Par ailleurs, et pour la plupart des paramètres étudiés, les 4 variétés ont réagi d'une manière différente au stress salin. En terme de productivité, la variété Cartamar s'est distinguée par un nombre de grains par plante élevé en absence et en présence du sel.

Mots clés : *Carthame, stress salin, variétés, osmorégulation, photosynthèse, nombre de graines.*

تأثير الإجهاد بالملوحة على خاصيات فسيولوجية وزراعية عند أصناف مختلفة من القرطم (*Carthamus tinctorius* L)

زرايبي ل. ، النبلوسي ع. ، ميريمي ج. ، العمراني أ. ، قجعيو م. ، خالد أ. والسرغيني القائد ه.

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير الإجهاد بالملوحة (0.05 مول و 0.1 مول من كلوريد الصوديوم) على أربعة أصناف من القرطم : Cartafri –Cartamar –Sharda –Rancho. شمل التقييم عدة خاصيات مورفولوجية وفسيولوجية وزراعية. وأظهرت النتائج أن الإجهاد المطبق له تأثير ملحوظ على معظم المعالم التي تشملها الدراسة. تسبب هذا الإجهاد في انخفاض طفيف في نمو النبتات (خفض مستوى طول النبات ومساحة الورقة). على مستوى الأوراق ،لوحظ تراكم السكريات القابلة للذوبان والبرولين، وانخفاض نسبة الكلوروفيل وتراكم المالونديلدهيد Malondialdehyde. كما كان هناك انخفاض في معدل التركيب الضوئي وعدد البذور للنبات، خاصة عند تركيز 0.1 مول من كلوريد الصوديوم .

وجود الارتباطات الإيجابية بين الحد من نشاط التركيب الضوئي من جهة، وانخفاض محتوى الكلوروفيل وعدد البذور، من ناحية أخرى، يشير إلى أن خفض عدد البذور تحت تأثير الإجهاد بالملح راجع إلى الحد من نشاط التركيب الضوئي، و ذلك بسبب انخفاض في محتوى الكلوروفيل.

إضافة إلى ذلك، بالنسبة لمعظم الخاصيات المدروسة، تجاوبت الأصناف الأربعة بطرق مختلفة مع هذا الإجهاد. بالنسبة لعدد البذور للنبات، يعتبر صنف Cartamar الأكثر إنتاجا سواءا في غياب أو في وجود الإجهاد بالملوحة.

الكلمات المفتاح : القرطم، الإجهاد بالملوحة، صنف، التركيب الضوئي، عدد البذور.

Salt stress effect on physiological and agronomic parameters of different safflower varieties (*Carthamus tinctorius* L.).

Abstract

This study aimed to determine the effect of salt stress (0.05 M and 0.1 M of NaCl) on four safflower varieties: Cartafri, Cartamar, Sharda and Rancho. The evaluation concerned morphological, physiological and agronomic characters. The results showed that the applied salt stress affected the majority of the studied parameters. In fact, this stress caused a low seedling growth reduction (plant height and leaf surface decrease). Soluble sugars, proline and Malondialdehyde (MAD) content increased while chlorophyll content decreased. Also, photosynthetic yield and plant seeds number were reduced, particularly at 0.1 M of NaCl. There were significant and positive correlations between the reduction of the photosynthesis activity and the decrease of the chlorophyll content and the plant seeds number. This indicated that, under salt stress, the seeds number was reduced because the photosynthesis activity was affected due to the chlorophyll content decrease. On the other hand, the 4 varieties were different in their response to saline stress for the most part of the evaluated characters. Regarding the seeds number per plant, Cartamar was the most productive under both salt stress and non-stress conditions.

Keywords: *Safflower, salt stress, varieties, osmoregulation, photosynthesis, seeds number*

Introduction

La salinité du sol est l'une des plus importantes contraintes abiotiques qui limitent la production mondiale agricole. Plus de 20% des surfaces cultivables dans les zones arides et semi arides sont ou seront affectées par une augmentation de la salinité, soit environ 16 millions d'hectares de sols salins dans le bassin méditerranéen, dont 350 000 ha au Maroc (Hamdy et Lacirignola, 1999). Au Maroc, la plupart des études réalisées dans les différents périmètres irrigués ont montré que des sols initialement non salés sont devenus salés après irrigation (Bamouh et El Falah, 2002). Les sols salés s'étendent le long des côtes, dans les basses plaines littorales, mais aussi dans les zones arides présahariennes et sahariennes. La présence du sel dans le sol se traduit par une réduction de la disponibilité de l'eau d'autant plus importante que le sol est sec et la salinité est forte. La région nord orientale du Maroc se caractérise par une pluviométrie annuelle faible et irrégulière ainsi que par des variations de températures saisonnières et quotidiennes très fortes.

Par ailleurs, les effets de la salinité (en plus d'un effet toxique dû aux ions Na^+ et Cl^-) sont très semblables à ceux de la sécheresse ; ce qui se traduit par des adaptations de la plante qui cherche à réduire ses pertes d'eau et à maintenir ses fonctions vitales.

L'une des solutions possibles pour faire face aux problèmes posés par la salinité consiste en la sélection de matériel végétal tolérant la salinité, qui resterait la voie économique la plus efficace pour l'exploitation des terrains affectés par la salinité (Shannon, 1985; Alonso *et al*. 1999; Ghoulam *et al*. 2000). La diversification de l'économie rurale à travers l'introduction de nouvelles cultures mieux adaptées aux conditions environnementales défavorables, telles que la salinité des sols, devrait permettre de minimiser l'impact social de ces conditions en assurant un minimum de ressources aux populations. Un intérêt particulier a été accordé au carthame, plante oléagineuse cultivée dans des régions semi–arides du monde à climat tempéré, notamment pour son huile végétale hautement riche en acides gras essentiels (Johnson *et al*, 1999 ; Weiss, 2000). En plus de sa résistance aux conditions de sécheresse et de hautes températures, le carthame est connu aussi pour sa tolérance de haut niveau de salinité dans le sol ou dans l'eau d'irrigation (Bassil et Kaffka, 2002). Il est considéré comme une plante qui peut produire de bons rendements en sol salin (Kar *et al*. 2007). L'encouragement de la pratique de la culture du carthame au niveau des zones arides et semi-arides valorisera ces régions qui sont actuellement difficiles à cultiver à cause de la salinité et contribuera à atteindre l'objectif de sécurité alimentaire en huiles alimentaires (Bamouh et El Falah, 2002). Dans les conditions marocaines, le carthame a montré une bonne adaptation et une bonne performance. En effet, l'évaluation d'une collection mondiale constituée de plus de 200 entrées dans différents environnements a montré qu'il y a des génotypes qui peuvent produire des rendements en grains qui dépassent 100 g par plante et de teneurs en huile supérieures à 40% (Nabloussi *et al*., 2008). Une étude menée au Liban, dont le climat méditerranéen présente les mêmes caractéristiques que celui du Maroc Nord oriental, a montré que le carthame présente le meilleur rendement et surtout le meilleur revenu net par hectare comparativement à d'autres cultures traditionnelles de

la région (Yau *et al*. 2004). En plus, le carthame, originaire de l'est de la méditerranée ou du moyen orient (Knowles, 1989 ; Fernández-Martínez, 1997), possède à la fois une forte teneur en acides gras polyinsaturés couplée à une forte teneur en tocophérols (Velasco et Fernández-Martínez, 2001). L'huile du carthame est riche en acide linoléique, acide gras insaturé qui aide à réduire le taux de cholestérol dans le sang. En outre, cette huile est utilisée en industrie agro-alimentaire comme huile de table et pour la fabrication de margarine (Velasco et Fernandez-Martinez, 2001) et en industrie chimique notamment pour la fabrication de peinture (Karakaya *et al*. 2004).

Le carthame est une plante oléagineuse très anciennement connue au Maroc, où il était autrefois cultivé comme plante tinctoriale et condimentaire (Bamouh et El Falah, 2002). Le carthame peut prospérer dans toutes les zones de culture du Maroc, y compris dans les zones à faible pluviométrie, alors que la superficie potentielle pour les autres cultures oléagineuses annuelles est plus limitée.

La présente étude vise à élucider l'influence du stress salin sur la culture du carthame (*Carthamus tinctorius* L) à travers l'évaluation de différentes variétés. Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un programme d'amélioration de la production végétale au niveau des sols affectés par la salinité et la sélection de variétés de plantes oléagineuses susceptibles de mieux valoriser les zones salines ou n'ayant que des ressources en eau saumâtre.

Matériel et méthodes

Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans cette étude est constitué de 4 variétés de carthame (*C. tinctorius*) issues de la collection de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA-Centre Régional de Meknès). Il s'agit de Cartafri et Cartamar, variétés marocaines, Rancho, variété espagnole, et Sharda, variété indienne.

Dispositif expérimental

L'essai a été installé sous serre à la pépinière du service des espaces verts de la Préfecture de Oujda. Le semis a été effectué le 25 janvier 2008 dans des plateaux alvéolaires remplis de tourbe sous serre à raison d'une graine par mini-motte. Après un mois, au stade 3 feuilles, la transplantation a été faite dans des sachets en plastique de 16 cm de diamètre et 45 cm de hauteur, à raison d'une plantule par sachet. Durant le cycle de la culture allant du 25/1/2008 au 15/7/2008, les températures maximales variaient de 22 °C à 48 °C et les températures minimales variaient entre 1 °C et 19 °C. L'essai a été conduit selon un dispositif en split-plot avec trois répétitions. Le facteur "Variété" a été affecté à la grande parcelle, alors que le facteur " Traitement sel" a été affecté à la petite parcelle. Pour chaque niveau du traitement sel, 5 plantes par variété ont été utilisées

Traitements utilisés

Afin d'appliquer différents niveaux de stress salin, les 4 variétés étudiées ont été soumises à des irrigations avec 3 solutions à différentes concentrations en NaCl sous le même régime hydrique correspondant à 100% d'ETP. Ces concentrations sont C0 (Traitement témoin sans sel) sous forme d'eau de puits ayant une conductivité électrique ECe = 2,61 ms/cm, C1 : 3 g de NaCl/l d'eau (0,05M), d'une conductivité électrique ECe = 5,8 dS/m et C2 : 6 g de NaCl/l d'eau (0,1M), d'une conductivité électrique ECe = 11,13 dS/m.

Les différentes concentrations utilisées ont été choisies en se référant aux données bibliographiques. Bassil et Kafka, (2002**)** ont démontré que l'eau saline peut être employée pour irriguer certaines variétés canadiennes de carthame sans risque de perte de rendement si les niveaux de salinité du sol et de l'eau sont moins de 8 dS/m. En conséquence nous avons choisi deux niveaux de salinité **:** 5.8dS/m correspondant à un stress modéré et 11.13dS/m correspondant à un stress sévère.

Paramètres mesurés

Les paramètres physiologiques mesurés au cours de cette étude ont été choisis en raison de leur fiabilité pour évaluer les effets néfastes de la salinité.

- La hauteur cumulée des plantes : elle correspond à la longueur totale des tiges mesurée, à l'aide d'une réglette millimétrique, chaque semaine durant toute l'expérimentation.

- Le nombre de feuilles de chaque plante (compté chaque 2 semaines).

- Le nombre de capitules de chaque plante a été compté après floraison et le nombre de graines a été déterminé après récolte à la maturité.

- Le poids sec (PS) des feuilles : est déterminé ; après deux mois de traitement salin correspondant au stade de floraison ; par une balance de précision après dessèchement des feuilles coupées à la base du limbe et préalablement pesées (PF), dans une étuve réglée à 60°C pendant 72 heures.

- La teneur en eau des feuilles : elle constitue également un critère de détermination du niveau du stress hydrique. Les mesures ont été effectuées sur trois plantes de chaque traitement. La formule suivante a été ensuite utilisée pour estimer la teneur en eau : TE % = [(PF - PS)/PF] × 100, avec TE = teneur pondérale en eau; PF = poids frais de l'échantillon, PS = poids sec de l'échantillon.

- La surface foliaire : après deux mois de traitement salin, des feuilles sont collectés sur les 5 plantes de chaque sous-bloc. La surface foliaire est estimée par la méthode suivante:

Pesée de la feuille en premier pour déterminer le poids frais PF.

Découpage d'un carré de 1 cm² de la même feuille.

Détermination par pesée du poids frais PF correspondant à la surface du carré sf.=1 cm².

Déduction de la surface de la feuille SF par la formule suivante: SF = (sf * PF)/ pf**.**

La surface foliaire totale est estimée en multipliant le nombre de feuilles par la surface foliaire unitaire.

- Le dosage des pigments chlorophylliens et des caroténoïdes :

Des feuilles prélevées de la partie médiane des plantes sont immédiatement pesées puis broyées dans de l'acétone à 80%. L'extrait obtenu est centrifugé à 2500 g pendant 5 min. La densité optique de la totalité du surnageant obtenu est mesurée à 663 nm, à 645 nm et à 460 nm. Les concentrations en chlorophylles (Ca et Cb) et en caroténoïdes (Ccar), exprimées en mg. g-1 MF, sont données par les formules Ca = (12,7*DO663 - 2,63*DO645), Cb = (22,9*DO645 - 4,68*DO663) exprimées en mg/l et [Ccar]= [5*DO460 - (3,19*Ca + 130,3*Cb)/200] Vt / 1000*m ; où Vt désigne le volume de l'extrait total en litres et m la masse de la matière fraîche broyée en grammes.

- Le dosage du Malondialdéhyde (MDA) :

L'extraction et le dosage du MDA ont été réalisés selon la méthode de Haeth et Parker (1968). L'extraction est réalisée par broyage des feuilles déjà pesées, prélevées dans la partie médiane des plantes dans un mélange constitué d'acide méta- phosphorique (0,5%, P/V), de butylhydroxytoluène (20%, P/V) et de 100 ml d'eau distillée. L'ensemble est porté à ébullition à 95°C pendant 30 mn et la réaction est arrêtée par refroidissement du mélange dans de la glace. Ensuite, l'ensemble est centrifugé à 5000 g/min pendant 30 min, l'absorbance est mesurée à 532 nm et à 600 nm à l'aide d'un spectrophotomètre (Spectrum SP 2000). La teneur en MDA est calculée par la formule suivante DO = ε.C.l (Loi de Beer Lambert) en utilisant le coefficient d'extinction molaire du MDA ($\varepsilon = 155$ l. mmol^{-1}. cm^{-1})

- Le dosage des sucres solubles :

L'extraction et le dosage des sucres solubles ont été réalisés sur des feuilles après 5 mois de stress salin selon la méthode de Halhoul et kleinberg (1972). Les feuilles sont prélevées et broyées dans 5ml d'éthanol à 80%. Après homogénéisation et centrifugation pendant 30 minutes à 6500g/min, le surnagent obtenu sert au dosage des sucres solubles. Sur 0.2 ml du surnagent, sont additionnés 6 ml du réactif d'anthrone 0.2% (0.2g/100ml d'acide sulfurique). La densité optique du milieu réactionnel a été déterminée par lecture spectrophotométrique à 630 nm. La teneur des feuilles en sucres solubles a été calculée par référence à une gamme étalon en glucose.

- Teneur en proline des feuilles (TP) :

La teneur en proline des feuilles a été déterminée selon la méthode de Monneveux et Nemmar (1986) après 5 mois d'application du NaCl. La valeur obtenue est convertie en concentration de proline par le biais d'une courbe étalon préalablement établie à partir d'une série de solutions de concentrations de proline connues. Les teneurs sont exprimées en mg de proline / g de MF.

- La fluorescence chlorophyllienne :

Les mesures de la fluorescence sont réalisées sur le tiers médian des feuilles prélevées de la partie médiane des plantes. La fluorescence réémise par l'échantillon de feuille est induite par une petite diode émettrice. Les mesures de fluorescence sont analysées et reproduites sous forme de courbe de fluorescence obtenues à l'aide d'un fluorimètre portable (Hansatech, King's Lynn, Norfolk, UK). Les mesures de la fluorescence chlorophyllienne ont été réalisées après 10 min d'obscurité et à la lumière (Genty *et al*., 1989). Pour chaque traitement, neuf répétitions ont été effectuées. Le calcul du rendement quantique maximum de la photochimie (mesuré à l'obscurité) est fait à partir de Fo (Emission de fluorescence lorsque tous les centres sont ouverts) et de Fm (émission de fluorescence lorsque tous les centres sont fermés). Le rendement quantique maximum de la photochimie des centres ouverts à la lumière (F'o/F'm) est calculé à partir des mêmes paramètres déjà cités dans des feuilles éclairées. Le rendement quantique opérationnel du photosystème II est aussi mesuré à l'obscurité et à la lumière

Analyse statistique

Une ANOVA II, à deux critères de classification (variété et concentration en NaCl), a été utilisée pour comparer les différents niveaux du stress salin ainsi que le comportement des variétés évaluées vis à vis de ce stress. Le programme statistique utilisé est le logiciel SPSS 11.5 pour Windows.

Résultats

Le tableau 1 montre que le stress salin appliqué ne provoque, à 0,1M, qu'une faible diminution de la croissance des plantules sous stress salin. Cette diminution se manifeste à la fois par une légère réduction de la hauteur des plantes (maximum de 8,5% chez la variété Cartafri) et une réduction de la surface foliaire. Avec la dose 0,05M, cette réduction a atteint 30%, au maximum, toujours chez la variété Cartafri. Cependant, cette faible diminution reste statistiquement significative (Tableau 2). Malgré le stress salin appliqué et indépendamment de la variété, la teneur en eau au niveau des feuilles reste relativement stable (Tableau 1, Tableau 2), ce qui laisse penser à un ajustement osmotique permettant de retenir l'eau au niveau cellulaire. A cet effet, la teneur en proline et en sucres solubles au niveau foliaire augmente drastiquement en conditions de stress salin (Tableau 2). Ainsi, après application d'une concentration de 0,1M de NaCl, la teneur foliaire en proline augmente d'environ 89% chez Cartafri, 72% chez Sharda, 81% chez Cartamar et 78% chez Rancho (Tableau 1). La teneur en sucres solubles présente la même évolution, que celle observée pour la teneur en proline, avec une augmentation maximale chez Rancho qui atteint 51,5% (Fig. 1). Des différences hautement significatives ont été observées entre les 4 variétés pour la teneur en proline, alors que pour la teneur en sucres solubles, ces variétés sont comparables (Tableau 2).

L'étude des paramètres (PSII et Fv/Fm) liés à la photosynthèse (Fig. 2, Fig. 3) montre que le rendement quantique opérationnel PSII (mesuré à la lumière ou après 10 min d'adaptation à l'obscurité) n'est pas affecté après un stress modéré de 0,05M. Cependant à 0,1M, à part la variété Cartafri, les trois autres variétés ont présenté une diminution hautement significative du rendement photosynthétique et du Fv/Fm (efficacité quantique maximale) (Tableau 2). Les variations les plus importantes ont été observées chez la variété Rancho aussi bien pour PSII que pour Fv/Fm. Le dosage des pigments photosynthétiques foliaires (Fig. 4) montre que les chlorophylles subissent une diminution plus au moins drastique selon les variétés. En effet, la variété Rancho voit sa teneur foliaire en chlorophylles diminuer d'environ 86,3% après application d'une concentration saline de 0,1M. Par ailleurs, il y a une corrélation positive, d'une part, entre la diminution de l'activité photosynthétique et la teneur en chlorophylle, avec des valeurs de R^2 de 0,78 chez la variété Sharda à 0,99 chez les autres variétés (Fig. 6). D'autre part, une corrélation positive existe entre la diminution de l'activité photosynthétique et le rendement en grains, avec des valeurs de R^2 de 0,88 chez la variété Rancho à 0,99 chez les autres variétés (Fig. 7). La teneur en caroténoïdes (pigment intervenant à la fois dans le processus antioxydatif et comme pigment photosynthétique) ne subit pas de changement significatif avec les stress appliqués (Tableau 2). En condition de stress salin, la teneur en caroténoïdes est voisine à celle du traitement témoin conduit à 0 g/l de NaCl chez les quatre variétés. Ces variétés sont aussi comparables quant à ce paramètre physiologique (Tableau 2), même si à 0,1M de NaCl, la teneur moyenne en caroténoïdes de la variété Rancho semble plus faible que celle des autres variétés. Concernant la teneur foliaire en MDA (Fig. 5), elle a augmenté sous stress salin d'une manière hautement significative, laissant penser à une possible altération des lipides membranaires au cours du stress appliqué (Tableau 2). Ainsi, après application d'un stress salin de 0,1M, l'augmentation a pu atteindre 83,2% chez Rancho, 80,8% chez Cartafri, 68,2% chez Cartamar et 55,9% chez Sharda. Enfin, pour les paramètres de productivité, en l'occurrence le nombre de grains par plante et le poids de mille graines, l'effet du stress salin appliqué a été très marquant (Tableau 2). En relation avec le nombre de graines par plante, la variété Cartamar était la plus productive aussi bien en absence qu'en présence du stress salin. En absence du stress (témoin), elle a eu en moyenne 57 graines par plante, alors que sous stress à 0,1M, ce nombre a chuté de 43% par rapport au témoin (0 g/l de sel), pour atteindre 33 graines par plante (Tableau 1). Les autres variétés ont eu des réductions drastiques qui dépassent largement 50%. Sous le même stress, la variété la plus tolérante, quant au poids de 1000 graines (PMG), est Cartafri qui a vu chuter ce paramètre de 42,3%, suivie de Rancho avec une diminution de 44,4% et de Cartamar avec une chute de 45,8%. En absence de stress salin (traitement témoin), Sharda a produit le PMG le plus élevé, soit 61,14 g, mais en condition de stress à 0,1M, cette variété s'est montrée la plus sensible en produisant un PMG de 18,13 g, soit une réduction de l'ordre de 70% (Tableau 2).

Enfin, Pour la majorité des caractères étudiés, il n'y a pas eu d'effet significatif de l'interaction variété x dose de sel. Cette interaction a eu un effet dans le cas de la teneur en chlorophylle, la teneur en proline, Fv/Fm, PS II et PMG (Tableau 2).

Discussion

Dans le présent travail, des différences variétales significatives ont été observées dans leur réaction au stress salin pour la majorité des caractères étudiés. Ce résultat est en concordance avec ce qui a été trouvé dans des travaux menés en Iran (Ghorashy *et al*. 1972 ; Dajue et Mündel, 1996), en Espagne (Velasco et Fernandez-Martinez, 2001) et en Turquie (Demir et Arif, 2003).

A l'image de nos résultats, des études antérieures avaient montré que les plantes de carthame affectées par la salinité ont tendance à être plus courtes et à produire des tiges plus minces (Mündel *et al*, 2004). La réduction de la croissance du carthame en conditions de stress a été également rapportée par Weiss (1971), Kurian et Iyengar (1972) ainsi que Bassil et kafka (2002). Ces derniers, ont constaté une réduction de la hauteur des plantules de différentes variétés canadiennes. Dans notre cas, il y a eu une faible réduction de croissance chez les 4 variétés étudiées. Cela pourrait s'expliquer soit par le fait que le stress salin appliqué (0,05 et 0,1M de NaCl) n'est pas assez sévère, bien qu'à 0,1M la conductivité du milieu est équivalente à 11,13 dS/m qui correspond a un niveau salin plus élevé que celui appliqué par Bassil et Kafka (2002), soit par le fait que les 4 variétés utilisées dans la présente étude présenteraient une meilleure résistance que les variétés des études antérieures. Cette résistance pourrait s'expliquer par le maintien d'un potentiel hydrique normal (pas de variations par rapport au témoin). Ce maintien pourrait être dû à l'accumulation d'osmoticums évalués dans notre étude par la proline et les sucres solubles dont les teneurs foliaires augmentent de façon significative. Nombreux travaux avaient déjà mentionné le rôle prépondérant de l'accumulation des osmoticums et notamment de la proline et des sucres solubles dans le cas de stress osmotique (Sivaramakrishnan *et al*., 1988). Ces mécanismes d'adaptation permettent aux plantules de maintenir la turgescence foliaire en diminuant le potentiel hydrique favorisant ainsi l'absorption d'eau malgré la présence du sel dans le sol. L'accumulation de proline observée dans le cas de stress salin chez plusieurs espèces (Ashraf et Foolad, 2007; Nagesh Babu et Devaraj, 2008; Tammam *et al*, 2008), à part son rôle d'osmoticum, contribuerait à la stabilisation des structures subcellulaires, au piégeage des radicaux libres et jouerait le rôle de tampon dans la régulation du potentiel redox sous stress (Ashraf et Foolad, 2007). L'augmentation de la teneur en sucres solubles lors d'un stress salin est parmi les phénomènes les plus observés dans la réponse au stress (Hajihashemi *et al*. 2006). Cette augmentation serait due, selon certains auteurs, à une modification d'activités enzymatiques liées au métabolisme glucidique. Ainsi, Udomchalothorn *et al*. (2009) observent chez les plantes de riz soumises à un stress salin une diminution de l'activité de la fructose 2-6-biphosphatase (F26BP), conduisant à une accumulation du saccharose et contribuant ainsi à l'augmentation de la tolérance au sel chez certaines variétés en augmentant l'osmolarité interne des cellules et les réserves disponibles en carbone. Par ailleurs, d'autres chercheurs

mentionnent que c'est la capacité de succion développée par les racines qui conditionne le maintien d'un bon potentiel hydrique au niveau des feuilles chez les plantes soumises à un stress hydrique ou salin (Steduto., 2000; Ali Dib *et al*. 1992). Ainsi, nous pouvons penser, à l'image d'autres auteurs (Johansson *et al*, 2000 et Munns, 2002), que la régulation de la teneur en eau est aussi reliée aux mécanismes de développement racinaire.

Nos résultats démontrent que même si l'effet du stress salin n'est pas si notable au niveau de la croissance de la partie aérienne, la photosynthèse, quant à elle, est fortement affectée. La diminution de l'activité photosynthétique chez différentes plantes soumises au stress salin (Jamil *et al*, 2007; Zheng *et al*, 2009) est citée par différents auteurs comme étant l'une des causes de la réduction de la croissance et de la productivité végétative ce qui est en concordance avec ce que nous avons trouvé (Wang, *et al***.** 1997; Ball *et al*, 1987). L'existence d'une telle relation indique que la diminution du rendement en grains et donc en huile sous l'effet du stress salin est dû notamment à une diminution du rendement quantique photosynthétique lui-même lié à une diminution de la teneur en chlorophylle. On peut en déduire donc que le rendement quantique du PSII et l'efficacité quantique maximale Fv/Fm pourraient être des critères de sélection pour un criblage approprié des génotypes de carthame résistants au stress salin. Cette diminution de l'activité photosynthétique pourrait s'expliquer soit par une dégradation ou une perturbation du système photosynthétique lui-même, soit par une dégradation des pigments photosynthétiques. La diminution drastique de la teneur en chlorophylles est en faveur de cette dernière hypothèse. La réduction de la concentration des chlorophylles des plantes sous stress pourrait être attribuée à une activation de la dégradation enzymatique par des chlorophyllases (Rao et Rao, 1981). De même, l'augmentation de la teneur en MDA foliaire, indicateur d'une dégradation oxydative des lipides membranaires, pourrait aussi expliquer cette diminution de l'activité photosynthétique. En effet, une dégradation lipidique entraînerait une perturbation des membranes thylacoïdales, une perte de l'intégrité des chloroplastes et par suite une diminution de l'activité photosynthétique (Benhassaine-Kesri *et al*, 2002). L'augmentation de la teneur en MDA observée dans une autre étude de stress salin (Zheng *et al*, 2009) serait aussi due à une réduction de l'activité de différentes enzymes du système antioxydant des feuilles, notamment de la SOD et de la catalase. Cela entraînerait une accumulation des espèces réactives à l'oxygène ou ROS (Reactive Oxygen Species), telles que l'ion superoxyde O_2^-, le peroxyde d'hydrogène H_2O_2, le radical hydroxyle OH, etc. dans les tissus et favoriserait donc l'oxydation des lipides membranaires. En cas de stress, les caroténoïdes sont d'excellents antioxydants qui joueraient le rôle de piège à radicaux libres et donc diminueraient la dégradation membranaire. Ainsi, la réduction de leur teneur chez les 4 variétés favoriserait les effets négatifs des réactions de péroxydation lipidique. La variété Rancho qui semble être la plus sensible au stress salin appliquée présente, en fait, la plus grande diminution du taux de caroténoïdes.

Dans notre étude, l'effet le plus important du stress salin sur les paramètres de productivité se manifeste par la chute notable du nombre de graines par capitule et par plante, d'une part, et du poids de mille graines, d'autre part. En revanche, le nombre de capitules par plante reste pratiquement inchangé suite à l'application du stress salin. Aussi, serions nous

amenés à penser que le stress salin n'affecte pas la floraison, mais plutôt la formation et le remplissage des graines. La diminution du nombre de graines par capitule et du poids de mille graines entraînerait, par conséquent, une chute du rendement en grain, comme cela a été démontré dans des recherches antérieures (Bidgoli *et al*., 2006 ; Nabloussi *et al*., 2008).

En conclusion, la comparaison des différents résultats obtenus pour les 4 variétés montre que la variété espagnole Rancho s'est révélée la moins résistante aux conditions de stress salin appliqué alors que la variété Cartafri serait la mieux adaptée à ce stress. La variété Cartamar a produit le nombre de graines par plante le plus élevé. Ce paramètre de productivité se trouve affecté, sous conditions de stress salin, par une diminution de l'activité photosynthétique due à une réduction de la teneur en chlorophylle.

Pour confirmer ces résultats, les 4 variétés étudiées, en plus de 21 autres génotypes, sont en cours d'évaluation dans les conditions réelles de plein champ pour leur résistance au stress salin combiné à un stress hydrique. En perspective, une ou plusieurs variétés adaptées au stress salin et au stress hydrique seront sélectionnées parmi le germoplasme de carthame disponible à l'INRA.

Remerciements

Tous les essais sous serre ont été réalisés à la pépinière du service des espaces verts de la Communauté Urbaine d'Oujda. Nous remercions le personnel de ce service pour leur accueil et aide précieuse.

Références bibliographiques

Ali Dib, T., P. Monneuveux et J.L. Araus. 1992. Adaptation à la sécheresse et notion d'ideotype chez le Blé dur II. Caractères physiologiques d'adaptation. Agronomie 12 : 381-393.

Alonso, J.M., T. Hirayama, G. Roman, S. Nourizadeh et J.R. Ecker. 1999. A bifunctional transducer of ethylene and stress responses in Arabidopsis. Science 25: 2148-2152.

Ashraf, M. et M.R. Foolad. 2007. Roles of glycinebetaine and proline in improving plant abiotic stress tolerance. Environ. Exp. Bot. 59: 206-216.

Ball, M.C., W.S. Chow et J.M. Anderson. 1987. Salinity-induced potassium deficiency causes loss of fonctional photosysteme II in leaves of the grey mangrove, Avicennia marina, through **depletion of atrazine-binding polypeptide. Aust. J. Plant Physiol. 14: 351–361.**

Bamouh, A. et S. El Falah. 2002. Potentialités des cultures oléagineuses hivernales dans les périmètres irrigués. Actes du Premier Symposium de la Société Marocaine d'Agronomie sur "Le développement de la filière des oléagineux au Maroc". pp 71-83.

Bassil, E.S. et S.R. Kaffka. 2002. Response of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) to saline soils and irrigation. Part II. Crop response to salinity. Agr. water management 54: 81-92.

Benhassaine-Kesri, G., F. Aid, C. Demandre, J.C. Kader et P. Mazliak. 2002. Drought stress affects chloroplast lipid metabolism in rape (*Brassica napus*) leaves. Physiol Plantarum 115: 221-227.

Bigdoli, A.M., G.H. Akbari, M.J. Mirhadi, E. Zand et S. Soufizadeh. 2006. Path analysis of the relationships between seed yield and some morphological and phonological traits in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). Euphytica 148: 261-268.

Dajue, L. et H.H. Mündel.1996. Safflower. *Carthamus tinctorius* L. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. 7. Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben/International Plant Genetic Resources Institute. ISBN 92-9043-297-7, Rome, Italie.

Demir, M. et I. Arif. 2003. Effects of different soil salinity levels on germination and seedling growth of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). Turkish Journal of Agriculture 27: 221-227.

Fernández-Martínez, J.M. 1997. Update on safflower genetic improvement and germplasm resources. Proceed. 4ème Conf. Internat. Carthame, Bari, Italie, 2-7 juin, 1997. pp. 187-195.

Genty, B., J.M. Briantais et N.R. Baker. 1989. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. Bioch et Bioph Acta. 990: 87-92.

Ghorashy, S.R., N. Sionit et M. Kheradnam. 1972. Salt Tolerance of Safflower Varieties (*Carthamus tinctorius* L.) during Germination. Agron. J. 64: 256-257.

Ghoulam, C, A. Foursy et K. Fares. 2002. Effect of salt stress on growth, inorganic ions and proline accumulation in relation of osmotic adjustment in five sugar beet cultivars. Environ. Exp. Bot. 47: 39-50.

Haeth, R.L. et L. Parker. 1968. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxydation. Arch. Biochem. Biophys. 125: 189-198.

Hajihashemi, S., K. Kiarostami, S. Enteshari et A. Saboora. 2006. The Effects of Salt Stress and Paclobutrazol on Some Physiological of two salt- tolerant and salt sensitive cultivars of wheat. Pakistan J. Biol. Sci. 9: 1370-1374.

Halhoul, M.N. et I. kleinberg. 1972. Differential determination of glucose and fructose yielding substances with anthrone. Anal Biochem. 50: 337-343.

Hamdy, A et C. Lacirignola. 1999. Mediterranean water resources: major challenges towards the 21st century. CIHEAM-IAM Bari, Italy, 570-4.

Jamil, M., S. Rehman, K.J. Lee, J.M. Kim et H.S. Kim. 2007. Salinity Reduced Growth Ps2 Photochemistry and Chlorophyll Content Radish; Eui. Shik. Rha1 Sci. Agric. 64: 111-118.

Johansson, I., M. Karlsson, U. Johanson, C. Larsson et P. Kjellbom. 2000. The role of aquaporins in cellular and whole plant water balance. Biochem. Bioph. Acta 1465: 324–342.

Johnson, R.C., J.W. Bergman et C.R. Flynn. 1999. Oil and meal characteristics of core and non-core safflower accessions from the USDA collection. Genet. Res. Crop Evol. 46: 611–618.

Kar, G., A. Kumar et M. Martha. 2007. Water use efficiency and crop coefficients of dry season oilseed crops. Agric. water Management 87: 73-82.

Karakaya, A, D. Başalma et S. Uranbey. 2004. Response of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes to rust disease. J. Agr. Sci. 10: 93-95.

Knowles, P.F. 1989. Safflower. In Oil crops of the world. R.K. Downey *et al*. (eds.), pp. 361–384.

Kurian, T. et E.R. Iyengar. 1972. Response of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) to salinity of sea-water. Ind. J. Agric. Sci. 42: 717–721.

Monneveux, P. et M. Nemmar. 1986. Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.) et chez le blé dur (*Triticum durum* L): Etude de l'accumulation de la proline au cours du cycle de développement. Agronomie 6: 583-590.

Mündel, H.H., R.E. Blackshaw, J.R. Byers, H.C. Huang, D.L. Johnson, R.J. Keon, R. Kubik, R. McKenzie, B. Otto, B. Roth et K. Stanford. 2004. Production du carthame dans les Prairies canadiennes. Centre de recherches de Lethbridge, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Lethbridge (Alberta).

Munns, R. 2002. Comparative physiology of salt and water stress. Plant Cell Environ. 25: 239–250.

Nabloussi, A., M. El Fechtali et S. Lyagoubi. 2008. Agronomic and technological evaluation of a world safflower collection in Morocco conditions. Proceed. 7ème Conf. Internat. Carthame, Waga Waga, Australie, 3-6 Novembre 2008.

Nagesh Babu, R. et V.R. Devaraj. 2008. High temperature and salt stress response in French bean (*Phaseolus vulgaris*). Aus. J. Crop Sci. 2: 40-48.

Rao, G.G. et G.R. Rao. 1981. Pigment composition and chlorophyllase activity in pigeon pea (*Cajanus indicus* Spreng) and Gingelley (*Sesamum indicum* L.) under NaCl salinity. Indian J. Exp. Biol. 19: 768-770.

Shannon, M.C. 1985. Principles and strategies in breeding for higher salt tolerance. Plant & soil 89: 227-241.

Sivaramakrishnan, S., V. Pattel, G. Flower et L.G. Paleg. 1988. Proline accumulation and nitrate reductase activity in contrasting sorghum lines during mid season drought stress. Plant Physiol. 74: 418-426.

Steduto, P. 2000. Methods to Estimate Crop Water Consumption. In Soil-Water Balance and Transport Processes. C. Kirada et P. Steduto (eds.). Review of Theory and Field Applications. Option Méditerranéenne 46: 1-25.

Tammam, A., M.F. Abou Alhamd et M. Hemeda. 2008. Study of salt tolerance in wheat (*Triticum aestium* L.) cultivar Banysoif. Aus. J. Crop Sc. 1: 47-52.

Udomchalothorn, T., S. Maneeprasobsuk, E. Bangyeekhun, P. Boon-Long et S. Chadchawan. 2009. The role of the bifunctional enzyme, fructose-6-phosphate-2-kinase/ fructose-2,6-bisphosphatase, in carbon partitioning during salt stress and salt tolerance in Rice (*Oryza sativa* L.). Plant Sci. 176: 334-341.

Velasco, L. et J.M. Fernández-Martínez. 2001. Breeding for oil quality in safflower. Proceed. 5th Internat. Safflower Conf., Williston, North Dakota and Sidney, Montana (USA), pp 133-137.

Wang, L.W., A.M. Showalter et I.A. Ungar. 1997. Effect of salinity on growth, ion content, and cell wall in Atriplex prostrata (Chenopodiaceae). Am. J. Bot. 84: 1247–1255.

Weiss, E.A, 1971. Castor, Sesame and Safflower. In Barnes and Nobles (eds.), New York.

Weiss, E.A. 2000. Safflower. In Oilseed Crops, E.A. Weiss (ed.), Blackwell Sci. Ltd., Victoria (Australia), pp. 93-129.

Yau, S.K., J. Ryan, M. Pala, M. Nimah et A. Nassar. 2004. Common vetch in rotation with barley: a sustainable farming system for a cool, semi-arid Mediterranean area New directions for a diverse planet. Proceed. 4th Internat. Crop Sci. Congress Brisbane, (Australia).

Zheng, C, D. Jiang, F. Liu, T. Dai, Q. Jing et W. Cao. 2009. Effects of salt and waterlogging stresses and their combination on leaf photosynthesis, chloroplast ATP synthesis and antioxidant capacity in wheat. Plant Sci. 176: 575–82.

Tableau 1. Variation de différents paramètres mesurés chez quatre variétés de carthame en fonction des concentrations appliquées NaCl (C0 : 0 M, C1: 0,05 M, C2 : 0,1 M). (Les valeurs rapportées correspondent aux moyennes ± écart-type)

		HTP (cm)	NFP	SFL (cm^2)	TEU (%)	NCP	NGP	NGC	PMG
Cartafri	C0	83,0±1,96	37,27±4,93	7,19±1,88	81,40±0,98	3,20±0,35	41±3,49	12,81±1,09	37,60±0,99
	C1	75,9±2,04	41,17±8,25	4,98±0,86	79,27±2,19	3,20±0,2	33±10,57	10,31±3,30	24,33±1,59
	C2	75,9±2,51	42,73±5,80	6,70±1,67	79,92±1,821	2,87±0,12	15,2±5,96	5,30±2,08	21,71±1,70
Sharda	C0	73,6±2,62	38,47±2,00	10,05±0,44	82,13±1,70	2,20±0,4	13±7,87	5,91±3,58	61,14±5,33
	C1	71,1±0,61	42,47±8,90	9,00±2,96	82,83±2,63	2,27±0,5	14±1,84	6,18±0,81	35,91±6,48
	C2	67,5±6,71	37,20±6,26	8,42±0,34	81,83±2,27	2,20±0,53	4,2±1,41	1,91±0,64	18,13±10,98
Cartamar	C0	81,0±4,41	54,53±14,10	12,96±2,31	82,07±1,24	3,40±0,35	57,07±10,44	16,78±3,07	32,25±4,55
	C1	78,8±4,40	48,40±18,54	9,92±0,735	80,41±1,40	3,07±0,92	56,33±7,21	18,37±2,35	25,84±6,47
	C2	75,7±7,73	53,13±16,01	10,48±0,22	81,33±1,05	3,33±0,64	32,6±11,88	9,78±3,56	17,47± 5,22
Rancho	C0	80,5±4,27	48,20±3,10	13,22±0,98	80,77±1,05	2,87±0,31	31,07±8,2	10,84±2,86	41,19±0,57
	C1	82,4±1,42	49,80±4,16	11,34±1,80	82,27±1,70	2,73±0,46	39,27±7,53	14,36±2,75	33,88±2,85
	C2	75,4±2,96	47,13±5,79	11,31±1,52	80,67±3,32	2,73±0,12	10,6±1,98	3,88±0,72	22,86 ±4,45

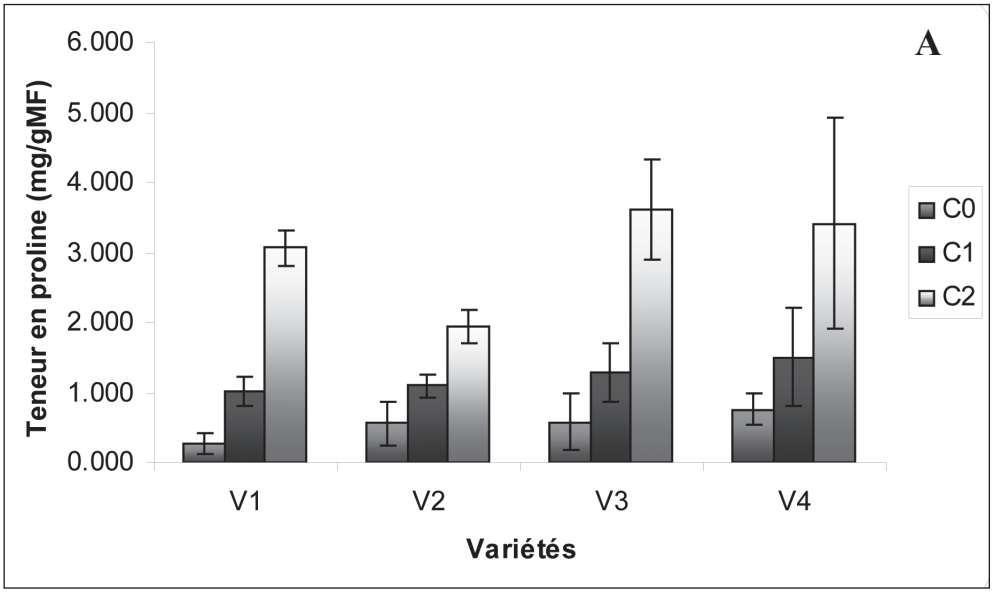
HTP : Hauteur de la plante ; NFP : Nombre de feuilles au niveau d'une plante ; SFL : Surface foliaire ; TEU : Teneur en eau ; NCP : Nombre de capitules par plante ;
NGP : Nombre de graines par plante ; NGC : Nombre de graines par capitule ; PMG : Poids de mille graines.

Tableau 2. Analyse de la variance (carrés moyens et niveau de signification des différences de caractères agromorphologiques et physiologiques étudiés chez 4 variétés de carthame soumises à différents niveaux de stress salin.

Caractères	Sources de variation		
	Variété (VR)	Niveau salinité (NS)	VR x NS
Teneur en caroténoïdes	0,005 ns [2]	0,006 ns	0,001 ns
Teneur en chlorophylle	0,365 ***	1,513 ***	0,086 ***
Fv/Fm (obscurité) [1]	0,023 **	0,083 ***	0,021 **
Fv/Fm (lumière)	0,035 ***	0,110 ***	0,034 ***
PS II (obscurité)	0,093 ***	0,279 ***	0,076 ***
PS II (lumière)	0,045 ns	0,289 ***	0,038 ns
Hauteur de la plante	147,292 ***	105,086 **	11,210 ns
Nombre de feuilles	340,757 *	2,126 ns	26,905 ns
Surface foliaire	57,010 ***	13,949 **	1,171 ns
Teneur en eau	6,438 ns	1,301 ns	2,517 ns
Nombre capitules par plante	47,213 ***	1,444 ns	1,407 ns
Nombre de graines par plante	48779,667 ***	50513,583 ***	3139,250 ns
Poids 1000 graines	302,567 **	1597,063 ***	147,473 **
Teneur en proline	4,882 ***	33,043 ***	2,979 ***
Teneur en sucres solubles	7,009 ns	31,044 ***	3,308 ns
Teneur en MDA	3,876E-09 ns	8,489E-08 ns	9,713E-09 **

1 Fv/Fm : efficacité quantique maximale ; PS II : rendement quantique opérationnel ; MDA : Malondialdéhyde

2 ns : effet non significatif ; ***, **, * : effet significatif au seuil 0,1%, 1% et 5%, respectivement.



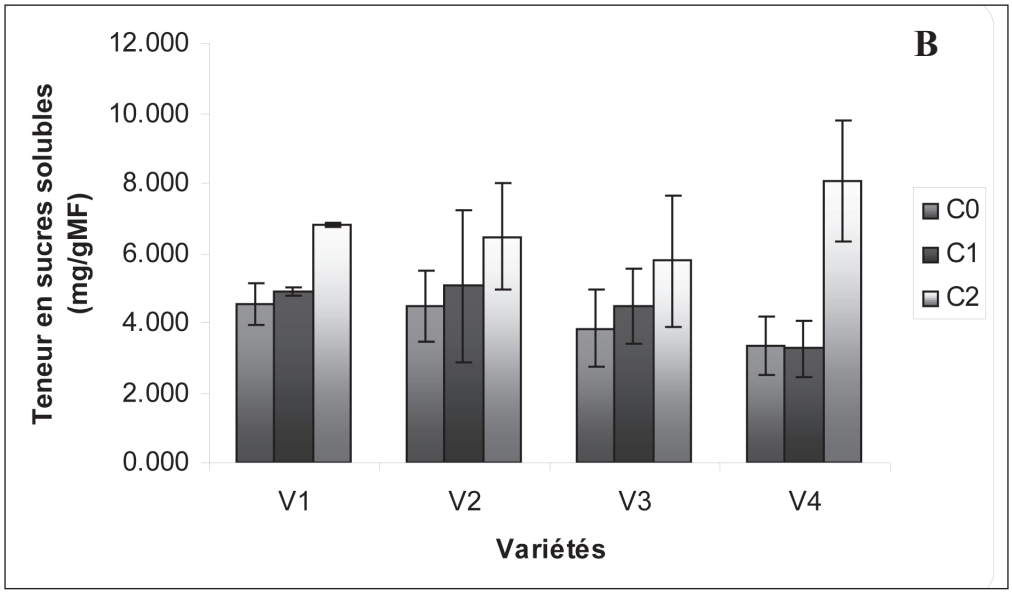


Figure1. Variation de la teneur en proline (A) et en sucres solubles (B) chez les variétés V1 (Cartafri), V2 (Sharda), V3 (Cartamar) et V4 (Rancho) en fonction des différentes concentrations de NaCl, après deux mois de traitement (C0 : 0M, C1 : 0,05M, C2 : 0,1M).

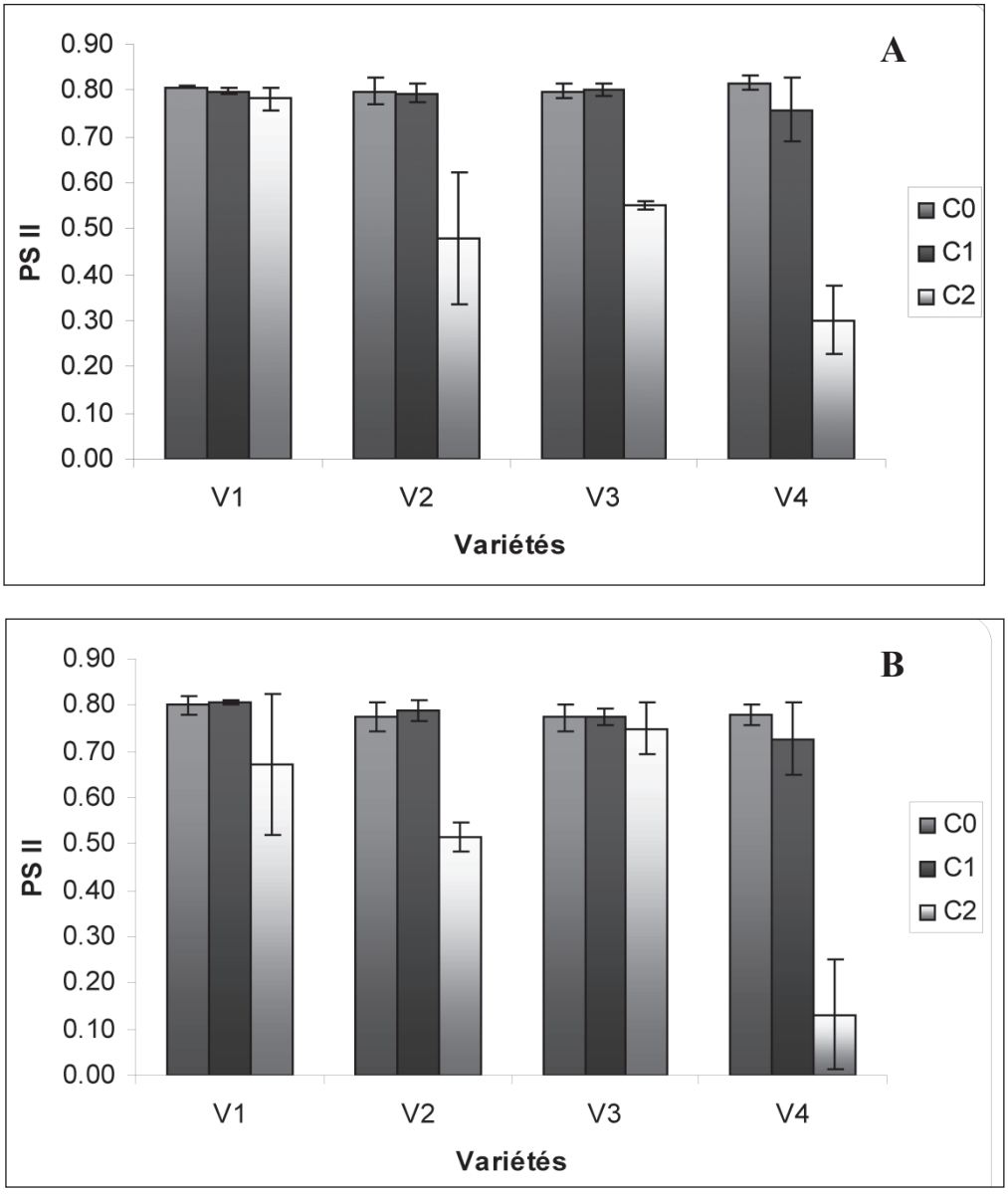


Figure 2. Variation du rendement quantique opérationnel PSII à la lumière (A) et après 10 mn à l'obscurité (B) chez les variétés V1 (Cartafri), V2 (Sharda), V3 (Cartamar) et V4 (Rancho) in vivo en fonction des différentes concentrations de NaCl après quatre mois de traitement (C0 : 0M, C1 : 0,05M, C2 : 0,1M).

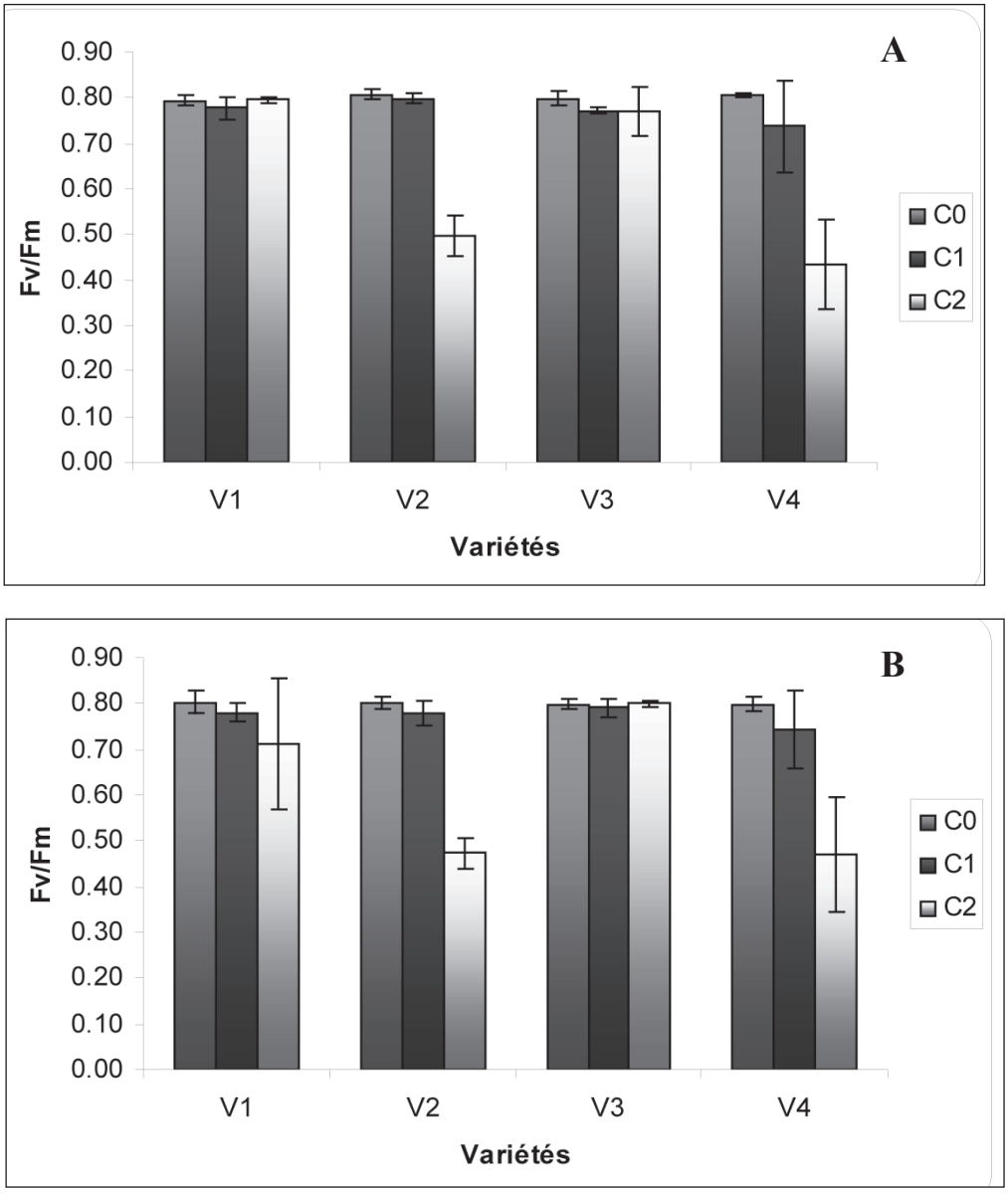
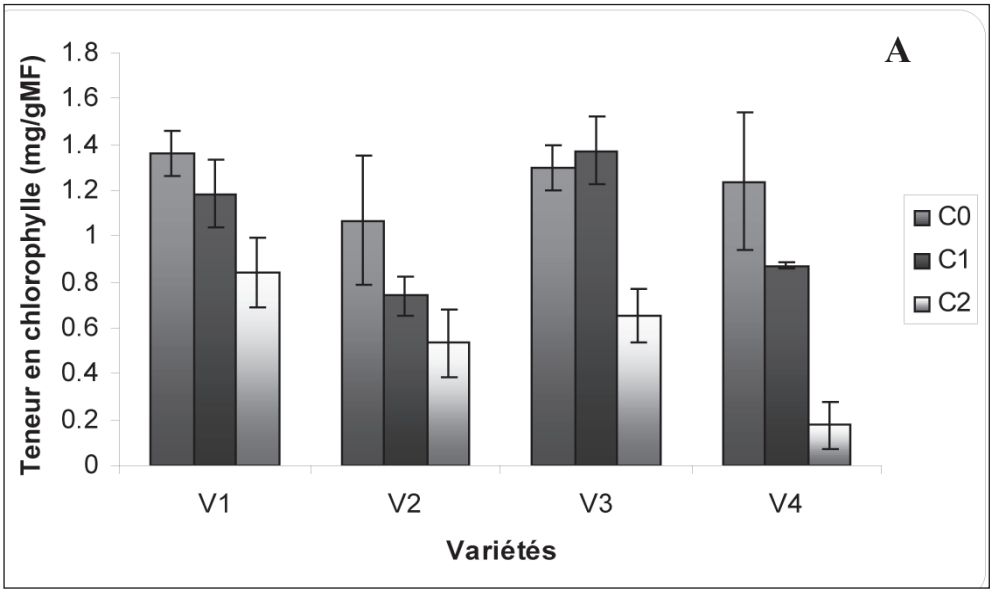


Figure 3. Variation du rendement quantique maximum (F'v/F'm) de la photochimie des centres ouverts à la lumière (A) et de l'efficacité quantique maximale Fv/Fm après 10 mn à l'obscurité (B) chez les variétés V1 (Cartafri), V2 (Sharda), V3 (Cartamar) et V4 (Rancho) *in vivo* en fonction des différentes concentrations de NaCl après quatre mois de traitement (C0 : 0M, C1 : 0,05M, C2 : 0,1M).



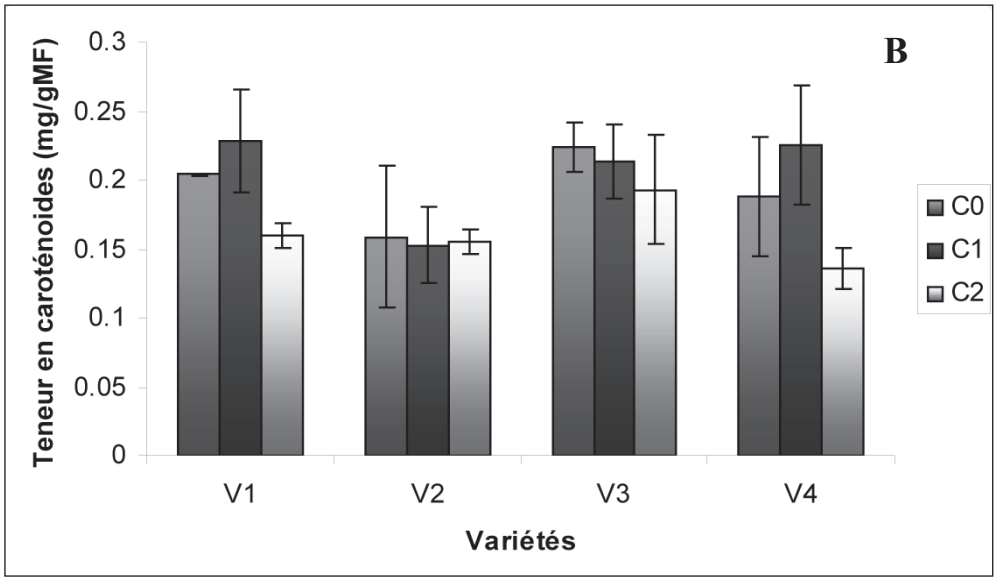


Figure 4. Variation de la teneur en chlorophylles (A) et en caroténoïdes (B) chez les variétés V1 (Cartafri), V2 (Sharda), V3 (Cartamar) et V4 (Rancho) *in vivo* en fonction des différentes concentrations de NaCl après quatre mois de traitement (C0 : 0M, C1 : 0,05M, C2 : 0,1M).

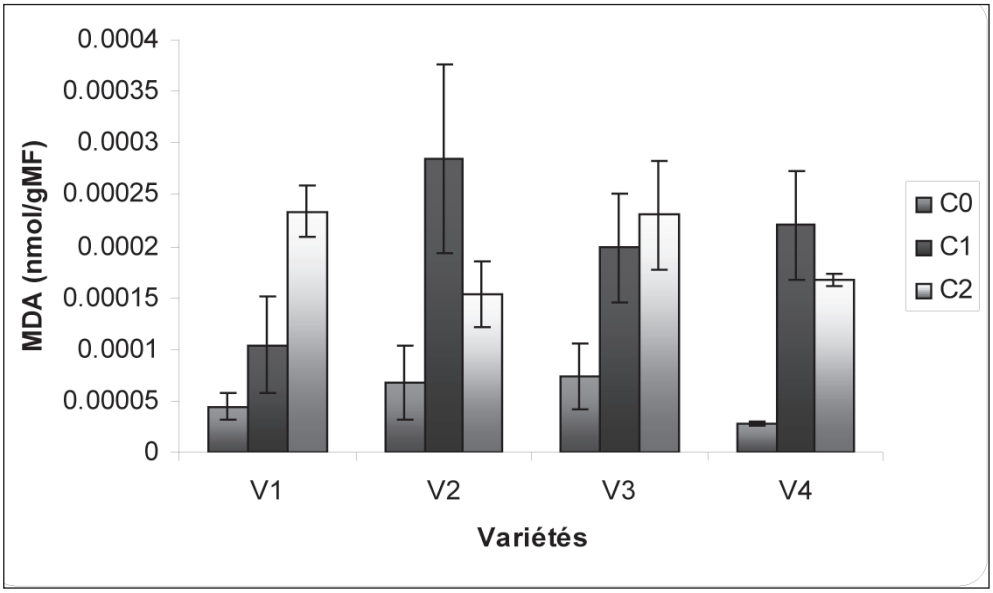


Figure 5. Variation de la teneur en MDA chez les variétés V1 (Cartafri), V2 (Sharda), V3 (Cartamar) et V4 (Rancho) *in vivo* en fonction des différentes concentrations de NaCl après quatre mois de traitement (C0 : 0M, C1 : 0,05M, C2 : 0,1M).

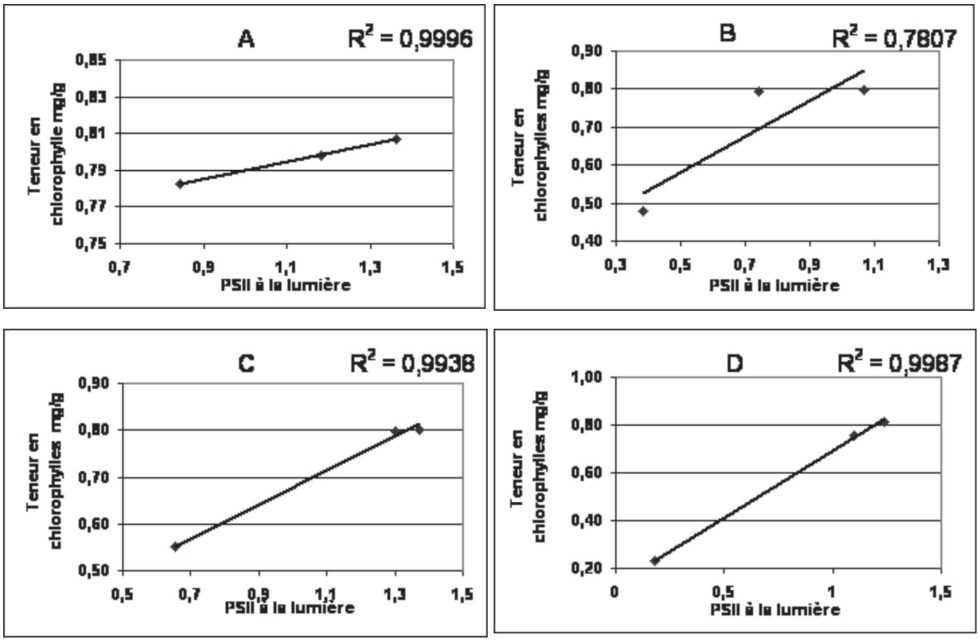


Figure 6. Corrélations positives entre la teneur en chlorophylles et le rendement quantique à la lumière PSII chez les variétés Cartafri (A), Sharda (B), Cartamar (C) et Rancho (D).

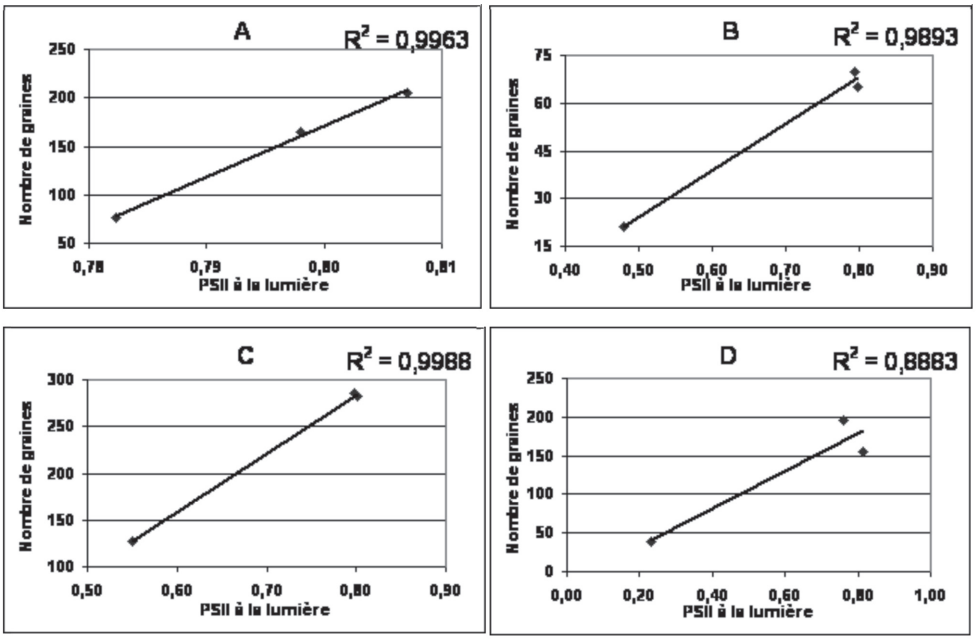


Figure 7. Corrélations positives entre le nombre de graines et le rendement quantique à la lumière PSII chez les variétés Cartafri (A), Sharda (B), Cartamar (C) et Rancho (D).