

Cet article de la revue **Fourrages**,
est édité par l'Association Française pour la Production Fourragère

Pour toute recherche dans la base de données
et pour vous abonner :

www.afpf-asso.org

Le chou fourrager (*Brassica napus* L.) solution pour la phytoremédiation et la conservation des sols salins

Y. Ben Bessis^{1,2}, M.T. Halilat², N. Salhi²

RESUME

Cette étude vise à évaluer le potentiel du chou fourrager (*Brassica napus* L.) pour le dessalement d'un sol salin. Pour cela, des choux ont été plantés sur un sol extrêmement salin et irrigué par une eau saline pendant 84 jours sans drainage. Puis, ils ont été soumis à différentes concentrations de chlorure de sodium pendant 7 irrigations de stress salin. La comparaison des résultats des analyses du sol avant la mise en culture avec les résultats des analyses du sol irrigué par l'eau de robinet a montré une diminution de la conductivité électrique (CE) de 14.5%, le TDS (les sels dissout totaux) de 18%, le chlorure (Cl⁻) de 13%, le sodium (Na⁺) de 0.3%, le potassium (K⁺) de 42% et le calcium (Ca⁺⁺) de 58%. Cependant, le magnésium (Mg⁺⁺) et le SAR (sodium adsorption ratio) ont augmenté respectivement par 89% et 9%. L'application d'un stress salin a entraîné une augmentation du Na⁺ du sol par respectivement 4% et 38%, le SAR de 23% et 42%. Le TDS (total dissolved salts) du sol n'a augmenté de 13% qu'après le stress par un surplus de 100mM.l⁻¹. La culture du chou fourragère (*Brassica napus* L.) a exporté dans sa biomasse jusqu'à 9 g/pot et 1,59 t.ha⁻¹ de sels minéraux et cette quantité a augmenté parallèlement à la concentration en NaCl. Le chlorure est l'élément le plus exporté par la biomasse du chou fourrager jusqu'à 8078mg/pot et le sodium exporté est plus de 110mg/pot. De ce fait, la culture de *Brassica napus* L. semble être une culture efficace pour la préservation des sols contre la salinisation et pour la phytoremédiation des sols salins.

SUMMARY

The potential of rapeseed (*Brassica napus* L.) to protect soils against salinisation and phytoremediate saline soils

This study aimed to evaluate the ability of rapeseed (*Brassica napus* L.) to desalinate saline soils. We performed in an experiment in which rapeseed was planted in extremely saline soil and irrigated with saline water for 84 days without any drainage. More specifically, we exposed rapeseed plants to seven rounds of irrigation using water containing different concentrations of sodium chloride (NaCl). When we compared the characteristics of the soil prior to planting with those of the control soil (irrigated with tap water), we found that the control soil had lower levels of electrical conductivity (EC; 14.5% lower), total dissolved salts (TDS; 18% lower), chloride ions (Cl⁻; 13% lower), sodium ions (Na⁺; 0.3% lower), potassium ions (K⁺; 42% lower), and calcium ions (Ca⁺⁺; 58% lower). In contrast, the control soil had a higher level of magnesium ions (Mg⁺⁺; 89% higher) and a higher sodium adsorption ratio (SAR; 9% higher). The two treatment soils irrigated with saline water (NaCl concentrations of 50 mM.l⁻¹ and 100 mM.l⁻¹, respectively) had higher levels of Na⁺ (4 and 38% higher, respectively) and higher SARs (23 and 42% higher, respectively). The TDS level increased only in the 100 mM.l⁻¹ treatment (by 13%). Rapeseed uptake of mineral salts was as high as 9 g/pot and 1.59 t/ha, and it increased with the NaCl concentration of the irrigation water. Uptake was greatest for Cl⁻ (up to 8,078 mg/pot), and it reached 110 mg/pot for Na⁺. These results suggest that rapeseed could be a useful crop for protecting soils against salinisation and aiding in the phytoremediation of already saline soils.

Abréviation

CE : conductivité électrique

SAR : Sodium adsorption ration

TDA : Total des sels dissous (Total dissolved salts)

L'agriculture est la principale source de nourriture pour près de 7 milliards de personnes et emploie près de 43 % de la main-d'œuvre mondiale ; pourtant, la faim continue de

toucher un milliard de personnes, principalement dans les zones rurales. La superficie mondiale consacrée à l'agriculture est de 3 milliards d'hectares. Cette superficie est en continuelle réduction à cause de la

AUTEURS

1 : Ecole Normale Supérieure d'Enseignants Ouargla, Département des Sciences de la Nature et de la Vie ; yaminabenbessisse@gmail.com

2 : Université Kasdi Merbah Ouargla, Laboratoire des ressources bio-sahariennes : Préservation et valorisation, Ouargla, 30000, Algérie

MOTS-CLES : Sol salin, salinisation, phytodessalement, NaCl, CE, SAR, TDS.

KEY-WORDS : saline soil, salinisation, phytodesalinisation, NaCl, EC, SAR, TDS

REFERENCE DE L'ARTICLE : Ben Bessis Y., Halilat M.T., Salhi N. (2020). « Le chou fourrager (*Brassica napus* L.) solution pour la phytoremédiation et la conservation des sols salins. » *Fourrages*, 243, 55-61

salinisation. On estime qu'il existe entre 1 et 10 milliards d'hectares de sols affectés par la salinité dans le monde (Yensen & Biel, 2006) dans plus de 100 pays (Qadir & Oster, 2002), avec un taux d'augmentation de 10 à 16 % par an (Aydemir et Sünger 2011). Ce taux de salinisation des sols devrait encore augmenter à cause du changement climatique et de l'utilisation d'eau de qualité médiocre.

L'irrigation, si elle n'est pas planifiée et gérée correctement, peut entraîner une salinisation accrue des sols. Adams et Hughes (1990) ont signalé que jusqu'à 50 % des terres irriguées sont affectées par la salinité, et sont peu rentables économiquement car considérées comme improductives.

La production agricole future dépendra de plus en plus de notre capacité à cultiver des aliments et du fourrage sur des terres touchées par la salinité (Qadir et al., 2008).

Le chou fourrager (*Brassica napus* L.) fait partie des fourrages annuels des années sèches. Une culture de rotation permet d'augmenter et de maintenir la fertilité des sols ; elle a une capacité exceptionnelle de constituer une réserve en fourrage vert pour une bonne partie de l'année. De plus, le chou fourrager est relativement tolérants au sel (Ashraf et McNeilly 1990 ; François, 1994). Cette plante est largement utilisée dans l'oasis d'Ouargla, au sud-est de l'Algérie, où la salinité du sol peut atteindre 50 dS.m⁻¹ à la surface pendant la saison estivale, et la conductivité électrique des eaux utilisées pour l'irrigation varie de 3 à 6,5 dS.m⁻¹ (Idder, & al., 2014).

La préservation des sols contre la salinisation et la valorisation des milieux salins, est donc une préoccupation majeure dans la recherche agronomique. Actuellement, peu d'informations sont disponibles sur la phytodésalinisation par l'utilisation de plantes alimentaires ou fourragères.

L'un des principaux objectifs de cette étude est d'évaluer les potentialités du chou fourrager (*Brassica napus* L.) pour la phytoremédiation des sols salins et la préservation des sols non dégradés contre la salinisation, dans les régions arides et semi-arides en conditions d'eau saline.

1. Matériel et méthodes

1.1. Le Matériel végétal

Les graines du chou fourrager utilisées dans cet essai, *Brassica napus* L. sont d'origine locale récoltées dans les palmeraies du Vieux Ksar de Ouargla.

1.2. Le substrat

Le substrat utilisé a été prélevé sur les 20 premiers centimètres de l'exploitation de la Faculté des Sciences Naturelles et de la Vie (Université de Ouargla-Algérie). C'est un sol sableux (65,3% de sable grossier, 29,1% de

sable fin, 4,6% de limon et d'argile). Les caractéristiques physicochimiques du sol sont indiquées dans le tableau 1, c'est un sol salin (CE_{1/5}=4.25 et TDS=8.9 g.l⁻¹), neutre (pH=7.59), avec un faible risque d'alcalinisation (SAR=2.14 (mmol.l⁻¹)^{0.5}).

L'essai a été réalisé dans des pots en plastique (39 cm de longueur, 12 cm de largeur et 15 cm de hauteur), non perforés (sans drainage), remplis de 5 kg de mélange de terre (3 volumes de terre/1 volumes de terreau).

1.3. Eau utilisée pour l'irrigation

L'irrigation a été assurée par une eau de puit du site de l'expérimentation (tableau 1). C'est une eau saline caractérisée par une CE= 4,03 dS.m⁻¹, y compris à la classe C4S2 à risque d'alcalinisation moyen (SAR = 5,19 mmol.l⁻¹)^{0.5}) (USSSL Staff, 1954 ; modifié par Shahid & Mahmoudi, 2014) et sans risque d'alcalinité résiduelle (RSC=-18meq.l⁻¹) (Eaton, 1950 ; Wilcox et al., 1954).

	Eau	Sol extrait (1 :5)
CE (dS.m ⁻¹)	4,03	4,25
pH	7,8	7,59
Na ⁺ (mg.l ⁻¹)	400	179,34
Ca ⁺⁺ (mg.l ⁻¹)	220	429,27
Mg ⁺⁺ (mg.l ⁻¹)	139,35	124,43
K ⁺ (mg.l ⁻¹)	22	78,24
HCO ₃ ⁻ (mg.l ⁻¹)	268	231,80
SO ₄ ⁻ (mg.l ⁻¹)	969,2	280
Cl ⁻ (mg.l ⁻¹)	864,70	727,51
TDS (g.l ⁻¹)	8,09	8,90
SAR (mmol.l ⁻¹) ^{0.5}	5.19	2.14
RSC (meq.l ⁻¹)	-18.05	-

TABLEAU 1 : Qualité du sol et de l'eau utilisés dans l'expérimentation
Table 1: *Characteristics of the soil and water used in the experiment*

1.4. Méthode de culture

Les graines ont été désinfectées à 5% de sodium hypochlorite pendant 3 min puis rincées abondamment à l'eau distillée et enfin, 10 graines ont été semées dans chaque pot.

L'essai a été réalisé en serre semi-automatique avec une température journalière à 20°C, une température nocturne de 15°C et une humidité relative comprise entre 60 et 70%. L'irrigation a été effectuée à raison de 30% de la capacité au champ soit 100ml par pot tous les trois jours.

1.5. Protocole expérimental

L'essai a duré 84 jours, après 60 jours de mise en culture, lorsque la tige des plantes a atteint trois nœuds (stade multi-feuilles) les plantes ont été soumises à un stress salin pendant 7 irrigations (soit une durée de 3

semaines), puis elles ont été arrosées avec l'eau du robinet jusqu'à la fin de l'essai.

Le dispositif expérimental adopté a été le bloc aléatoire complet composé de 18 pots, soit 6 pots par traitement.

Les plantes sont soumises à trois traitements :

- 1) T1: eau de robinet +0 mM/l de NaCl= 40 mM/l NaCl
- 2) T2: eau de robinet + 50mM/l de NaCl= 90mM/l NaCl
- 3) T3: eau de robinet +100mM/l de NaCl= 190 mM/l NaCl

Après 84 jours, les plantes ont été récoltées. Des analyses des plantes et du sol ont été effectuées. L'analyse physico-chimique du sol a été effectuée sur le sol avant et après la mise en culture et analyse de la plante a été effectuée à la fin de l'expérience.

◆ Analyse du sol

pH, $CE_{1/5}$, TDS, Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{++} et Mg^{++} ont été mesurés dans les extraits 1/5 (20 g sol+100ml d'eau distillée). Na^+ et K^+ ont été déterminés par spectrophotomètre à flamme de la marque JENWAY PFP7, Ca^{++} , Mg^{++} par complexométrie, chlorure par titrage avec $AgNO_3$ 0.1N, le pH avec le pH mètre OHAUS 3100, le CE et le TDS par le multi-paramètre OHAUS3000.

Le SAR a été calculé à partir des concentrations de Na^+ , Mg^{++} et Ca^{++} (en $meq.l^{-1}$) dans le sol extrait (1/5) selon la formule : $SAR = Na^+ / [(Ca^{++} + Mg^{++})/2]^{0,5}$

L'analyse du sol a été effectuée avant la mise en culture (T0) et après la récolte, à la fin de l'expérience, pour les trois traitements au NaCl (T1, T2 et T3).

◆ Composition chimique des plantes

A la fin de l'expérience, les plantes ont été récoltées, et séchées au four à 65°C pendant 48 heures, pesées et broyées. L'extraction ionique a été effectuée par incubation de 20 mg de chaque échantillon dans 30 ml de HNO_3 (0,5%) pendant trois jours avec agitation régulière. Les extraits ont ensuite été filtrés par papier filtre et immédiatement analysés pour les concentrations de Na^+ , K^+ , Cl^- et Ca^{++} et Mg^{++} .

Na^+ , K^+ ont été déterminés par spectrophotomètre à flamme marque JENWAY PFP7 et Cl^- , Ca^{++} , Mg^{++} par titrage.

◆ Capacité de phyto-désalinisation

La capacité de la phyto-désalinisation est la quantité des sels minéraux exportée à partir du sol et accumulée dans les parties végétatives de la plante par pot et par hectare.

Dans notre cas, ce paramètre a été estimé en multipliant la moyenne de la quantité des minéraux accumulés dans les tissus végétaux de la plante en mg/g matière sèche avec le total de la quantité de la matière sèche récoltée par pot selon la formule suivante.

$$X \text{ (mg/pot)} = X \text{ (mg/g de MS)} \times \text{Qté totale MS/pot}$$

dont X: élément minéral et MS : matière sèche de la plante de chou fourrager (*Brassica napus* L.)

Total sels (t/ha) = $\sum X(\text{mg/pot}) \times 10000 / Ps(\text{m}^2)$,
dont Ps : la surface du pot.

1.6. Analyse statistique

Les données relatives à l'expérience ont fait l'objet d'une analyse de variance (ANOVA) à un facteur et deux facteurs de classification (logiciel CoStat version 6.4) puis un classement des moyennes a été effectué à l'aide du test de LSD. La différence moyenne est significative au niveau $P < 0,05$.

2. Résultats et discussions

2.1. Le sol

Selon le projet PNUD/FAO(1990), le sol à un pH neutre. Les résultats de suivi du sol montre que le pH du sol ne présente pas un changement significatif ($p < 0,05$) pour les trois traitements (T1, T2 et T3) en comparant avec le témoin T0 (sol avant la mise en culture) (Figure 1(a)). De ce fait l'irrigation du chou fourrager avec une eau salée à dominance NaCl n'a pas provoqué une alcalinisation du sol.

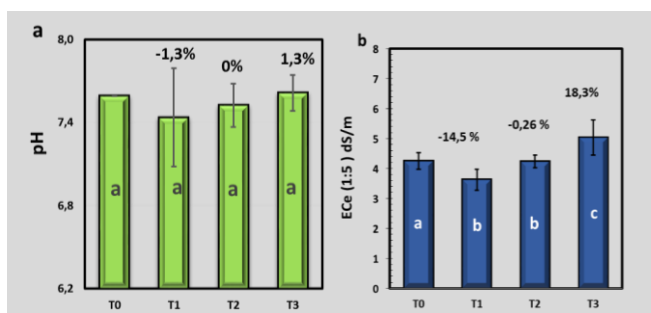


FIGURE 1 : (a) Evolution du pH et (b) de la conductivité électrique du sol irrigué avec différentes concentrations de NaCl avec pourcentage de variation par rapport au T0. Moyenne de 6 répétitions \pm écart type. a, b, c indiquent une différence significative.

FIGURE 1 : Differences in (a) pH and (b) electrical conductivity (EC) among the different treatment categories. The percentages above the bars reflect the percentage difference from T0. The values are the means \pm standard deviations for six replicates. Bars with different letters have significantly different values

Selon l'échelle de Durand (1983), le sol utilisé pour l'expérience est un sol très salé. L'analyse des résultats après la culture du chou fourrager, a montré une diminution significative de la conductivité électrique (CE) de 14,5% en T1 (Figure 1(b)). Malgré un apport de 50 mM de NaCl dans l'eau, la salinité n'a pas varié de manière significative entre T1 et T2. Cependant, elle a augmenté de 18% en T3 lorsque le chou fourrager a été soumis à un stress de 100mM/L de NaCl, pendant 7 irrigations. La réduction de la CE pourrait s'expliquer par l'activité des racines à absorber les sels,

principalement le cation Na^+ du sol (Qadir et Oster, 2002).

En comparant l'efficacité du chou fourrager à diminuer la salinité du sol à des halophytes spontanés, on constate que l'efficacité du chou fourrager est plus faible. *Arthrocnemum indicum* (Willd.), *Suaeda fruticosa* et *Sesuvium portulacastrum* L ont diminué considérablement la salinité du sol $\text{CE}_{(\text{pate saturée})}$, de 19 dS/m dans le sol initialement à 12 dS/m (Rabhi et al., 2009).

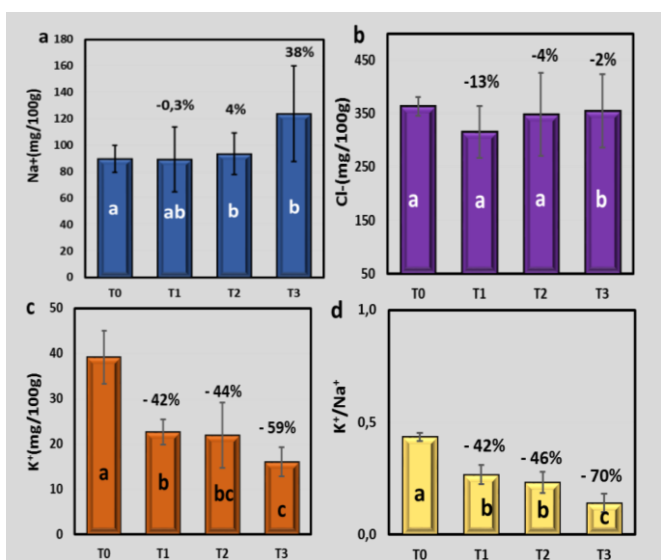


FIGURE 2 : Evolution des concentrations Na^+ (a), Cl^- (b), K^+ (c), et rapport K^+/Na^+ (d) en fonction de la concentration en NaCl dans l'eau d'irrigation. Le pourcentage est la variation par rapport au T0. Moyennes des 6 répliques \pm écart type. a, b, c indiquent une différence significative ou des similitudes.

Figure 2 : *Differences in (a) Na^+ levels, (b) Cl^- levels, (c) K^+ levels, and (d) K^+/Na^+ ratios among the different treatment categories. The percentages above the bars reflect the percentage difference from T0. Depicted are the means \pm standard deviations for six replicates. Bars with different letters have significantly different values*

La teneur en sodium du sol a enregistré une légère diminution de l'ordre de 0.3% pour le traitement T1 mais elle a augmenté pour les traitements T2, T3 (Figure 2a), mais avec des proportions différentes, une augmentation de 4% s'est produite dans T2 tandis que pour T3 c'est 38% d'augmentation de sodium. L'ANOVA a montré une **variation significative de la teneur en sodium du sol entre avant et après la mise en culture**, mais elle n'a pas changé de manière significative entre les différents traitements. L'irrigation avec une eau saline à dominance NaCl a enrichi le sol en sodium. Un excès de Na^+ libéré dans le sol par l'irrigation pourrait donner lieu à des conditions de sol sodique dans lesquelles la structure du sol se dégrade (Crescimanno et al, 1995).

Par contre, pour le chlorure et le potassium, tous les traitements ont montré une diminution, mais à un rythme différent. Malgré l'augmentation de la

concentration de NaCl dans l'eau d'irrigation la teneur en chlorure du sol a diminué de 13% pour T1 (sol irrigué par l'eau de robinet), de 4% et 2% pour respectivement T2 et T3. Une diminution significative de teneur en potassium du sol a été enregistrée. Cette diminution a été proportionnelle à l'augmentation de la concentration en NaCl dans l'eau d'irrigation pour les traitements T1, T2 et T3 respectivement 42%, 44% et 59%. La diminution de ce dernier signifie que l'exportation du potassium par la plante du chou fourrager a augmenté avec la concentration de NaCl (Figure 2 b, c). Par conséquent, un rapport K^+/Na^+ dans le sol est toujours inférieur à un et il diminue avec l'augmentation de la concentration en NaCl dans l'eau d'irrigation (Figure 2d).

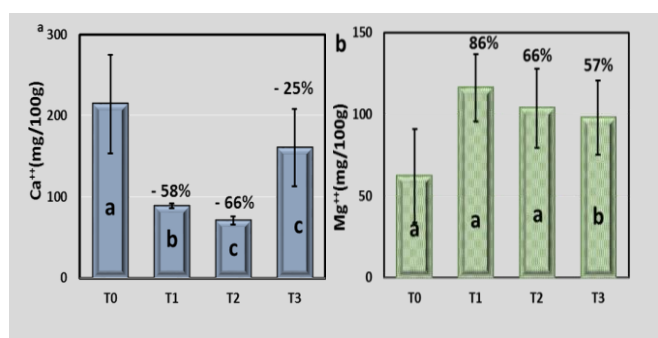


FIGURE 3 : Evolution des concentrations Ca^{++} (a), Mg^{++} (b) en fonction de la concentration en NaCl . Le pourcentage est la variation par rapport au T0. Moyennes des 6 répliques \pm écart type. a, b, c indiquent une différence significative ou des similitudes.

Figure 3 : *Differences in (a) Ca^{++} levels and (b) Mg^{++} levels among the different treatment categories. The percentages above the bars reflect the percentage difference from T0. Depicted are the means \pm standard deviations for six replicates. Bars with different letters have significantly different values.*

La concentration en Ca^{++} dans le sol a diminué significativement ($p < 0.05$) après la culture de chou fourrager pour T1 et T2 et T3 (Figure 3a), ce qui signifie que l'exportation de Ca^{++} par la culture de chou fourrager est supérieure à l'importation de Ca^{++} par l'eau d'irrigation. Cette diminution est de l'ordre de 58% et 66% en T1 et T2 cependant elle a été de 25% en T3. Ce qui confirme qu'avec une concentration élevée en NaCl , le chou fourrager favorise les exportations du Na^+ et du K^+ au détriment du Ca^{++} . Qadir et al. (2000, 2002, 2003); Qadir et Oster (2004) ont mentionné que les racines facilitent la substitution de Na^+ par Ca^{++} dans leur rhizosphère et améliorent les propriétés physiques du sol, ce qui conduit à une lixiviation du sodium.

La teneur en Mg^{++} du sol a augmenté pour les trois traitements, cette augmentation est due aux apports par l'eau d'irrigation qui est de l'ordre de 139,35 mg/l (tableau 1), et c'est également d'exportation faible de la plante (Figure 5c et figure 6c).

L'irrigation avec une eau salée a entraîné une augmentation non significative ($p < 0.05$) du SAR (sodium adsorption ratio) du sol sous la culture du chou fourrager, mais le sol a montré une diminution significative au TDS (total des sels dissous) pour T1 avec 18% et T2 avec 4% (Figure 4_{a,b}), et une augmentation de 13% en T3. De nombreux articles (Minhas *et al.*, 2007 ; Shekhawat *et al.*, 2006 ; Gharaibeh *et al.*, 2011) ont largement suggéré que l'absorption végétal du sel est faible par comparaison au taux de sel apporté par irrigation. L'irrigation en T3 par l'eau saline a entraîné une augmentation de 13% du TDS (total des sels dissous) dans le sol, ce qui montre que l'efficacité de phytodessalement d'un sol salé dépend de la qualité d'eau d'irrigation utilisée dans le processus de remédiation.

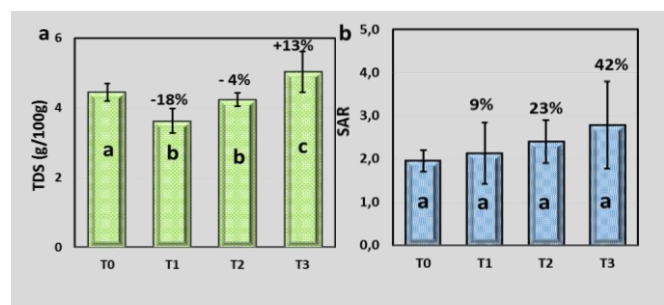


FIGURE 4 : Evolution de TDS(a) et SAR(b), avec pourcentage de variation par rapport au T0 (sol avant la mise en culture), du sol irrigué avec différentes concentrations de NaCl. Moyennes des 6 répliques \pm écart type. a, b, c indiquent une différence significative ou des similitudes.

Figure 4: **Differences in (a) TDS and (b) SAR among the different treatment categories** The percentages above the bars reflect the percentage difference from T0. Depicted are the means \pm standard deviations for six replicates. Bars with different letters have significantly different values.

2.2. Composition chimique de la plante

Les résultats du dosage des teneurs en Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{++} et Mg^{++} accumulées dans les tissus des plantes de *Brassica napus* L. après avoir subi les différents traitements, indiquent que la teneur en ions accumulés est en augmentation corollairement à la concentration en NaCl (Figure 5).

Le Cl^- présente la teneur la plus élevée en comparaison aux autres éléments dosés. La teneur en Mg^{++} n'a pas été affectée significativement par la variation de la concentration en NaCl de l'eau d'irrigation. Le magnésium est l'élément dont l'accumulation reste la plus faible par la plantes *Brassica napus* L. avec 2.36 mg/g MS, 2.51 mg/g MS et 2.6 mg/g MS en T₁, T₂ et T₃ respectivement (Figure 5_c). La teneur en Na^+ augmente significativement avec la concentration en NaCl de l'eau d'irrigation, (5.52 mg/g MS, 8.16 mg/g MS et 17.72 mg/g MS respectivement en T₁, T₂ et T₃) (Figure 5_a). Pour la plante fourragère étudiée, la teneur en K^+ accumulée par les tissus végétaux augmente significativement avec la

concentration en NaCl dans l'eau d'irrigation avec 2.44 mg/g MS, 3.05 mg/g MS et 3.43 mg/g MS en T₁, T₂ et T₃ respectivement (Figure 5_e). Le sodium était absorbé plus que le potassium ce qui rendait le rapport K^+/Na^+ inférieur à un. Le rapport K^+/Na^+ n'a pas été affecté significativement par la variation de la concentration en NaCl en T₂ et T₃ respectivement 0.37 et 0.27 mais avec une différence significative en T₁ de 0.44 (Figure 5_a).

Dans l'ensemble, les résultats ont montré que l'élévation de la concentration de NaCl dans l'eau d'irrigation a entraîné une augmentation des éléments minéraux accumulés dans les tissus de la plante *Brassica napus* L. Le Cl^- est l'élément le plus absorbé, selon GreenWay et Munns (1980), les ions chlorure sont plus vite absorbés par les plantes que les ions sodium. Des niveaux élevés de Ca^{++} accumulés ont été trouvés dans la plante *Brassica napus* L ; le Ca^{++} est nécessaire pour réguler le métabolisme cellulaire et pour protéger les membranes contre les dommages potentiels induits par le stress salin (Casierra-Posada & Rodríguez, 2006). Les résultats ont montré que la teneur en Na^+ accumulée par la plante est en augmentation avec la concentration en NaCl dans l'eau d'irrigation, ces résultats concordent avec les résultats de Hernandez *et al.*, 2018 qui a étudié la capacité de *Vicia sativa* L. à dessaler un sol. Une importante exportation de calcium et une faible exportation de sodium justifie l'augmentation du SAR du sol (Figure 4_b). Les teneurs en potassium aussi augmentent avec la concentration en NaCl, selon Pares et Basso (2013) l'assimilation de cet élément constitue le principal mécanisme pour combattre le stress salin, le potassium maintient la turgescence cellulaire, la régulation osmotique et participe à l'expansion cellulaire. K^+ et Na^+ sont impliqués dans l'ajustement osmotique des tissus foliaires à un faible potentiel hydrique externe, qui peut être causé par une faible humidité du sol ou une forte salinité du sol (Osmond *et al.* ; 1980). En général, K^+ s'accumule en réponse à une faible humidité du sol, tandis que Na^+ s'accumule dans des conditions salines (Glenn *et al.*, 1996). Un rapport K^+/Na^+ élevé peut indiquer i) un besoin de potassium pour la plante afin de tolérer la toxicité du sodium ; ii) une plante très sélective au K^+ par rapport au Na^+ . Ainsi, l'absorption du sodium serait plus faible en présence de niveaux élevés de potassium (Jesus *et al.*, 2015). Selon Conn et Gilliam, 2010, les concentrations élevées en sodium interfèrent

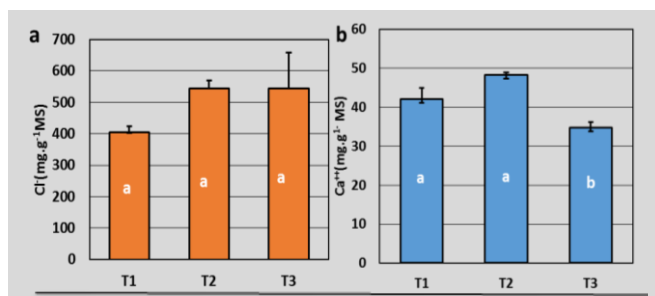


FIGURE 5

avec la capacité d'accumulation en potassium de la plante.

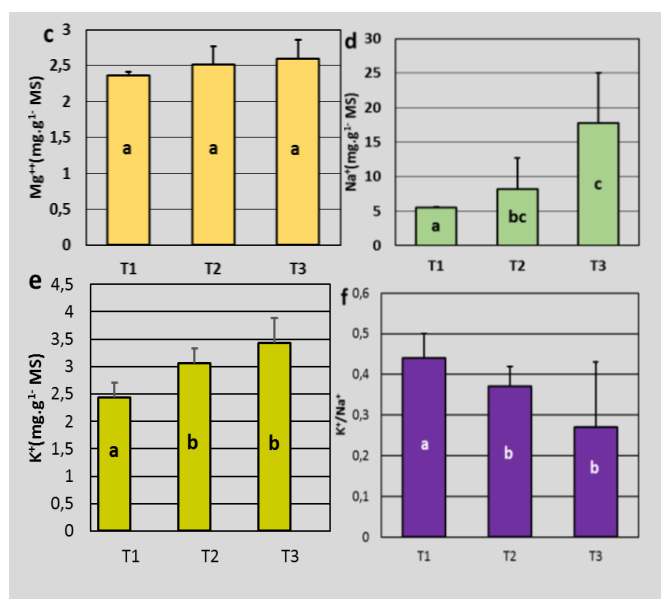


FIGURE 5 : Composition minérale Cl⁻(a), Ca⁺⁺(b), Mg⁺⁺(c), Na⁺(d), K⁺(e), et rapport K⁺/Na⁺(f), du chou fourrager (*Brassica napus* L.) cultivé sur un sol salin irrigué avec une eau saline à différentes concentrations de NaCl Moyennes des 6 répliques ± écart type. a, b, c indiquent une différence significative ou des similitudes.

Figure 5: Mineral composition of rapeseed (*Brassica napus* L.) grown in saline soil irrigated with water containing different concentrations of NaCl for 84 days without any drainage (T1—soil irrigated with tap water; T2—soil irrigated with tap water containing 50 mmol.l⁻¹ NaCl; and T3—soil irrigated with tap water containing 100 mmol.l⁻¹ NaCl).

2.3. Capacité de phyto-désalinisation

Le chou fourrager (*Brassica napus* L.) peut être considéré comme exportateur de sels et de chlorure de sodium provenant de sols salins irrigués avec de l'eau salée (tableau 2). Le chlorure c'est l'élément le plus exporté par 8078,18 mg/pot en T1, le stress salin par un surplus de 50mM/l et 100mM/l dans l'eau d'irrigation a favorisé l'exportation de chlorure par la plante *Brassica napus* L. sans différence significative par 10895mg/pot en T2 et T3 (tableau 2). Suivi par le calcium 841,65 mg/pot, 967,36 mg/pot et 696,31 mg/pot respectivement en T1, T2 et T3. L'augmentation de la concentration en NaCl dépasse 100mM/l a diminué la quantité de calcium exporté par pot. Néanmoins, l'augmentation de la concentration en NaCl dans l'eau d'irrigation augmente toujours la quantité de sodium exportée par pot par 110,55 mg/pot, 163,35 mg/pot et 354,52 mg/pot (tableau 2). La quantité de potassium exportée aussi a été proportionnelle avec l'augmentation de la concentration en NaCl dans l'eau d'irrigation 48,86 mg/pot, 61,17 mg/pot et 68,77 mg/pot respectivement en T1, T2 et T3 (tableau 2). Cependant le magnésium a été exporté à partir du sol

en faible quantité sans différence significative entre T1, T2 et T3 (tableau 2).

Brassica napus L., a exporté à partir du sol 1,95t/ha de sels dissous dans ses parties végétatives, cette quantité augmente dans les conditions de stress salin, où le traitement T2 et T3 de l'eau porte à 2,5 t/ha du sel total dissous exportés du sol par le chou au cours des 84 jours (Tableau 2).

Jesus et al., 2015 ont mentionné que les exportations des sels peuvent varier de 0.091t/ha/an pour *Lotus corniculatus* à 5.376 t/ha/an pour *S. portulacastrum*, qui sont deux plantes halophytes. Cependant, les non-halophytes (ou tolérants au sel) peuvent avoir une capacité d'absorption du sel importante, par exemple, *Typha angustifolia* a enlevé 1,2t/ha/an.

	T1	T2	T3
Cl ⁻ (mg/pot)	8078,18 ±101	10895±900	10895 ±2703
Ca ⁺⁺ (mg/pot)	841,65 ±163	967,36±20	696,3 ±44
Mg ⁺⁺ (mg/pot)	47,26 ±12	50,3 ±7,6	50,29 ±11
Na ⁺ (mg/pot)	110,55 ±11	163,35±109	354,52 ±180
K ⁺ (mg/pot)	48,86 ±1,6	61,17±7	68,77 ±8
total (g/pot)	9.12 ±0,9	12.13±0,9	12.06 ±2.8
total (t/ha)	1,95 ±0,2	2,59±0,2	2,57 ±0,6

TABLEAU 2 : Cl⁻(a), Ca⁺⁺(b), Mg⁺⁺(c), Na⁺(e), K⁺(f), et total des sels (g), exportés par le chou fourrager à différentes concentrations de NaCl. Moyennes des 6 répliques ± écart type.

Table 2 : Uptake of (a) Cl⁻, (b) Ca⁺⁺, (c) Mg⁺⁺, (e) Na⁺, (f) K⁺, and (g) total salts by rapeseed (*Brassica napus* L.) grown in saline soil irrigated with water containing different concentrations of NaCl.

Conclusion

La présente étude a démontré la capacité du chou fourrager (*Brassica napus* L.) à réduire la salinité d'un sol salin en diminuant la conductivité électrique et en abaissant la concentration des sels dissous totaux principalement le chlorure, le calcium et le potassium et en faible quantité le sodium. Le stress salin a diminué l'efficacité de phytodessalement du sol par le chou fourrager (*Brassica napus* L.). Cette étude aussi a montré la capacité du chou fourrager (*Brassica napus* L.) à accumuler dans ses parties végétatives des éléments minéraux, à savoir le chlorure, le calcium, le sodium le potassium et le magnésium, ce qui fait que cette plante a potentiellement la capacité de désalinisation des sols. Étant donné que cette plante, non seulement assainit les sols salés mais fournit également de la nourriture et du fourrage ; cela donne au chou fourrager une valeur économique. Il est

important de souligner que cette expérience a été menée en pot et sans drainage. Ces conditions peuvent limiter et réduire l'efficacité de cette plante. De ce fait, il pourrait être intéressant de répéter cette expérience au champ et avec drainage pour déterminer la capacité réelle de phytodessalement de cette plante.

Article accepté pour publication le 26 juin 2020.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adams W.M. & Hughes F.M.R., (1990). "Irrigation development in desert environments". In: *Goudi AS* (ed) Techniques for desert reclamation. Wiley, New York, 135–160.
- Ashraf M. & McNeilly T., (1990). "Responses of four Brassica species to sodium chloride". *Environ. Exp. Bot.*, 30, 475–487.
- Aydemir S. & Sünger H., (2011). "Bioreclamation effect and growth of a leguminous forage plant (*Lotus corniculatus*) in calcareous saline sodic soil". *Afr J Biotechnol* 10:115571–115577
- Casierra-Posada, F. and Rodríguez, S. (2006). "Tolerancia de plantas de feijoa (*Acca sellowiana* [Berg] Burret) a la salinidad por NaCl». *Agronomía Colombiana*, 24, 258–265.
- Conn S.J. & Gilliam M. (2010). «Comparative physiology of elemental distributions in plants». *Annals of Botany* 105, 1081–1102
- Crescimanno G., Iovino M. & Provenzano G. (1995). "Influence of Salinity and Sodicity on Soil Structural and Hydraulic Characteristics". American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America journal, <https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900060028x>
- Durand J.H., (1983). « Les sols irrigables, Etude pédologique ». Ed. Département de géographie de l'université de Paris – Sorbonne, 389 p.
- Eaton F.M., (1950). "Significance of carbonates in irrigation waters". *Soil Sci* 69:123–133 FAO/UNESCO (1973) Irrigation, drainage and salinity. An International source book. Unesco/ FAO, Hutchinson & Co (Publishers) Ltd, London, 510p.
- François L., (1994) "Growth, seed yield and oil content of canola growth under saline conditions". *Agron. J.*, 86, 233–237.
- Gharaibeh M.A., Eltaif N.I., Albalasmeh A.A., (2011). "Reclamation of highly calcareous saline sodic soil using *Atriplex halimus* and by-product gypsum". *Int J Phytorem* 13:873–883
- Glenn E. P., Pfister R., Brown J., Thompson T. L. and O'Leary J. (1996). "Na and K accumulation and salt tolerance of *Atriplex canescens* (Chenopodiaceae) genotypes". *Am. J. Bot.* 83:997–1005
- Greenway H. & Munns R. (1980). "Mechanisms of salt tolerance in non-halophytes". *Annu. Rev. Plant Physiol.*, 31, 149–190
- Hernández M.A.L., Alvarez-Bernal D., Cárdenas G.C., & Estrada S.O. (2018). "Improvement of saline soils with *Vicia sativa* L. from a semiarid region". *Bragantia*, 77(3), 501–509. doi:10.1590/1678-4499.2017275
- Idder T., Idder A., Tankari Dan-Badjo A., Benzida A., Merabet S., Negais H. & Serraye A. (2014). « Les oasis du Sahara algérien, entre excédents hydriques et salinité. L'exemple de l'oasis de Ouargla ». *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 27 (2), 155–164. <https://doi.org/10.7202/1025565ar>
- Jesus J.M., Danko A.S., Fiúza A., & Borges M.-T. (2015). "Phytoremediation of salt-affected soils: a review of processes, applicability, and the impact of climate change". *Environmental Science and Pollution Research*, 22(9), 6511–6525. Doi : 10.1007/s11356-015-4205-4
- Minhas P.S., Dubey S.K., Sharma D.R. (2007). "Effects on soil and paddy– wheat crops irrigated with waters containing residual alkalinity". *Soil Use Manag* 23:254–261. Doi : 10.1111/j.1475-2743.2007.00090x
- Osmond C.B., Bjorkman O., and Anderson D. J. (1980). "Physiological processes in plant ecology: Toward a synthesis with Atriplex". Springer-Verlag, Berlin, FRG.
- Pares J. and Basso C. (2013). "Efecto del cloruro de sodio sobre el crecimiento y estado nutricional de plantas de papaya ». *Bioagro*, 25, 109–116.
- PNUD (1990). Evaluation globale de la dégradation du sol dans le monde (GLASODISRIC/ PNUE/FAO, 1990
- Qadir M, Oster J. (2002). "Vegetative bioremediation of calcareous sodic soils: history, mechanisms, and evaluation". *IrrigSci* 21:91–101. doi: 10.1007/s00271-001-0055-6
- Qadir M., Oster, J.D. (2004). Crop and irrigation management strategies for salinesodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture. *Sci. Total Environ.* 323, 1–19.
- Qadir M., Qureshi R.H., Ahmad N. (2002). « Amelioration of calcareous saline-sodic soils through phytoremediation and chemical strategies". *Soil Use Manage.* 18, 381–385.
- Qadir M., Steffens D., Yan F., Schubert S. (2003). "Proton release by N₂-fixing plant roots: a possible contribution to phytoremediation of calcareous sodic soils". *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 166, 14–22
- Qadir M., Tubeileh A., Akhtar J., Larbi A., Minhas P.S., & Khan M.A. (2008). "Productivity enhancement of salt-affected environments through crop diversification". *Land Degradation & Development*, 19(4), 429–453. Doi: 10.1002/ldr.853.
- Rabhi M., Hafsi C., Lakhdar A., Haji S. (2009). "Evaluation of the capacity of three halophytes to desalinate their rhizosphere as grown on saline soils under nonleaching conditions". *Afr J Ecol* 47:463– 468. doi:10.1111/j.1365-2028.2008.00989.x
- Shahid S.A., Mahmoudi H. (2014). "National strategy to improve plant and animal production in the United Arab Emirates". *Soil and water resources Annexes*
- Shekhawat V.P.S., Kumar A., Neumann K.-H. (2006). "Bio-reclamation of secondary salinized soils using halophytes". *Biosaline agriculture and salinity tolerance in plants*. In: Öztürk M, Waisel Y, Khan MA, Görk G (eds) Birkhäuser Basel, pp 147–154. Doi: 10.1007/3-7643-7610-4_16
- USSL Staff (1954). "Diagnosis and improvement of saline and alkali soils". USDA Handbook No 60. Washington DC, USA 160p.
- Wilcox L.V., Blair G.Y., Bower C.A. (1954). "Effect of bicarbonate on suitability of water for irrigation". *Soil Sci* 77:259–266
- Yensen N.P., Biel K.Y. (2006). « Soil remediation via salt-conduction and the hypotheses of halosynthesis and photoprotection ecophysiology of high salinity tolerant plants". In: Khan MA, Weber DJ (eds), vol 40. Tasks for vegetation science 34. Springer Netherlands, pp 313–344. Doi:10.1007/1-4020-4018-0_21.