

1.2.3.2 Effet de l'addition du Zinc au stress salin sur l'activité ascorbate peroxydase (APX)

L'influence de l'addition du Zinc sur l'activité ascorbate peroxydase au niveau des feuilles et des racines des plantes de blé dur soumises au stress salin est mise en évidence dans les (**Figure 68, Figure 69, Figure 70, Figure 71**). L'analyse de la variance a seul critère de classification, montre une augmentation très hautement significative dans les feuilles de la variété *GTA dur* avec toutes les doses de traitement.

L'exposition des plantes de blé dur aux fortes concentrations de NaCl ou de Zinc provoque une augmentation des concentrations de l'ascorbate peroxydase au niveau des feuilles et des racines par rapport au témoin. Nous constatons également selon nos résultats, que l'interaction des deux concentrations dans les solutions nutritives induit une forte stimulation de l'activité ascorbate peroxydase.

Le traitement avec la dose 25 mM NaCl enregistre une valeur d'activité enzymatique de $2,451.10^{-6}$ qui passe à $3,247.10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines), $3,393.10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines), $4,912.10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines), $5,176.10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines) et de $1,322.10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines) à $1,578.10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines), $1,767.10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines), $4,474.10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines), $7,660.10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines) avec l'ajout de 0.12, 0.25, 0.5 et 1 mM ZnSO₄ chez la variété *GTA dur* et *Semito* respectivement.

Les racines semblent être plus affectées. L'activité enzymatique APX enregistré avec le traitement au NaCl seul enregistre $3,468.10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines), $2,958.10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines), $7,195.10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines), $8,554.10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines) pour atteindre $1,361.10^{-5}$ (nmol/min/mg protéines), $1,646.10^{-5}$ (nmol/min/mg protéines), $1,777.10^{-5}$ (nmol/min/mg protéines), $1,939.10^{-5}$ (nmol/min/mg protéines) et de $1,438.10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines), $1,776.10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines), $3,397.10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines), $5,380.10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines) à $8,633.10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines), $8,776.10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines), $1,096.10^{-5}$ (nmol/min/mg protéines), $1,141.10^{-5}$ (nmol/min/mg protéines) avec la plus forte dose de Zinc (1 mM) chez la variété *GTA dur* et *Semito* respectivement.

1.2.3.3 Effet de l'addition du Zinc au stress salin sur l'activité gaïacol peroxydase (GPX)

L'influence de l'addition du Zinc sur l'activité gaïacol peroxydase au niveau des feuilles et des racines des plantes de blé dur soumises au stress salin est mise en évidence dans les figures (**Figure 72, Figure 73, Figure 74, Figure 75**). L'analyse de la variance a seul critère de classification, montre une augmentation très hautement significative dans les feuilles de la variété *GTA dur* avec toutes les doses de traitement.

D'après nos résultats, nous observons une augmentation des concentrations du gaïacol peroxydase au niveau des feuilles et des racines des plantes de blé dur traitées

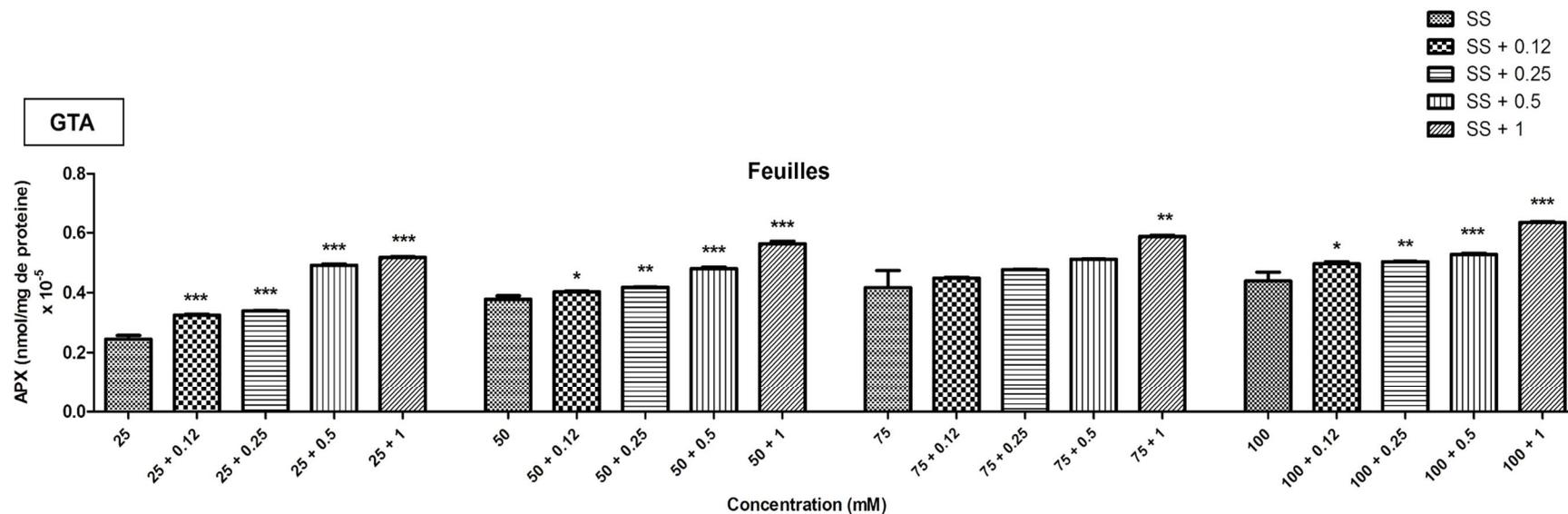


Figure 68. Effet de Zinc sur l'activité de l'ascorbate peroxydase (APX) dans les feuilles de la variété *GTA dur* soumise au stress salin

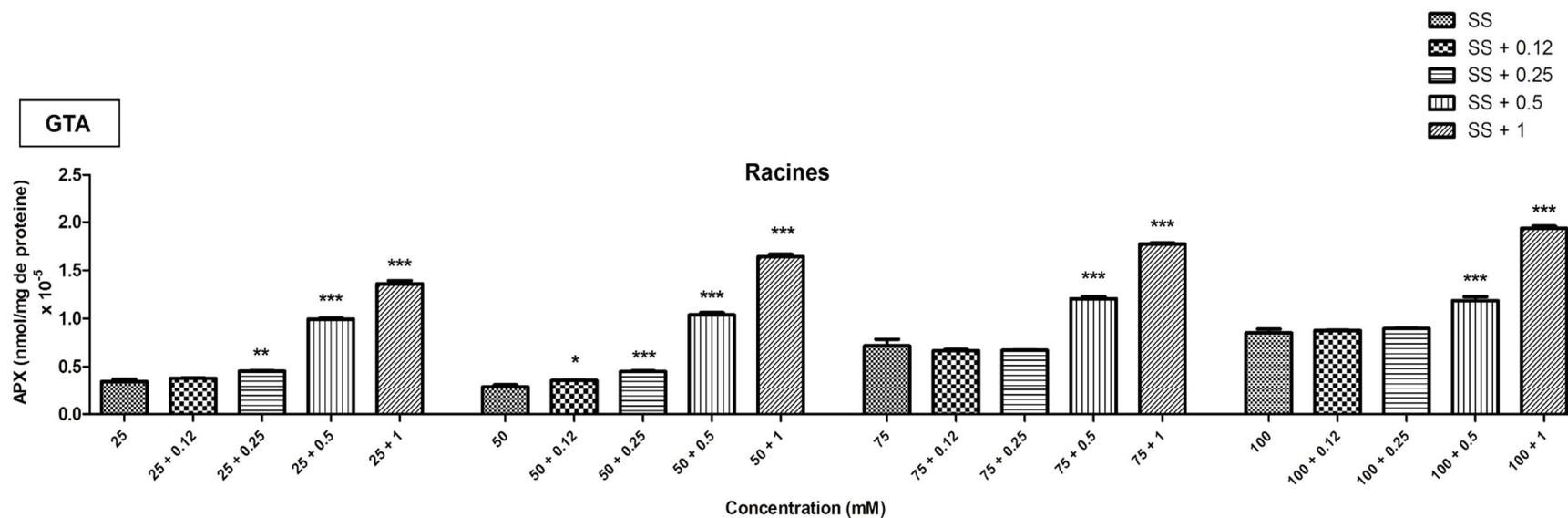


Figure 69. Effet du Zinc sur l'activité de l'ascorbate peroxydase (APX) dans les racines de la variété *GTA dur* soumise au stress salin

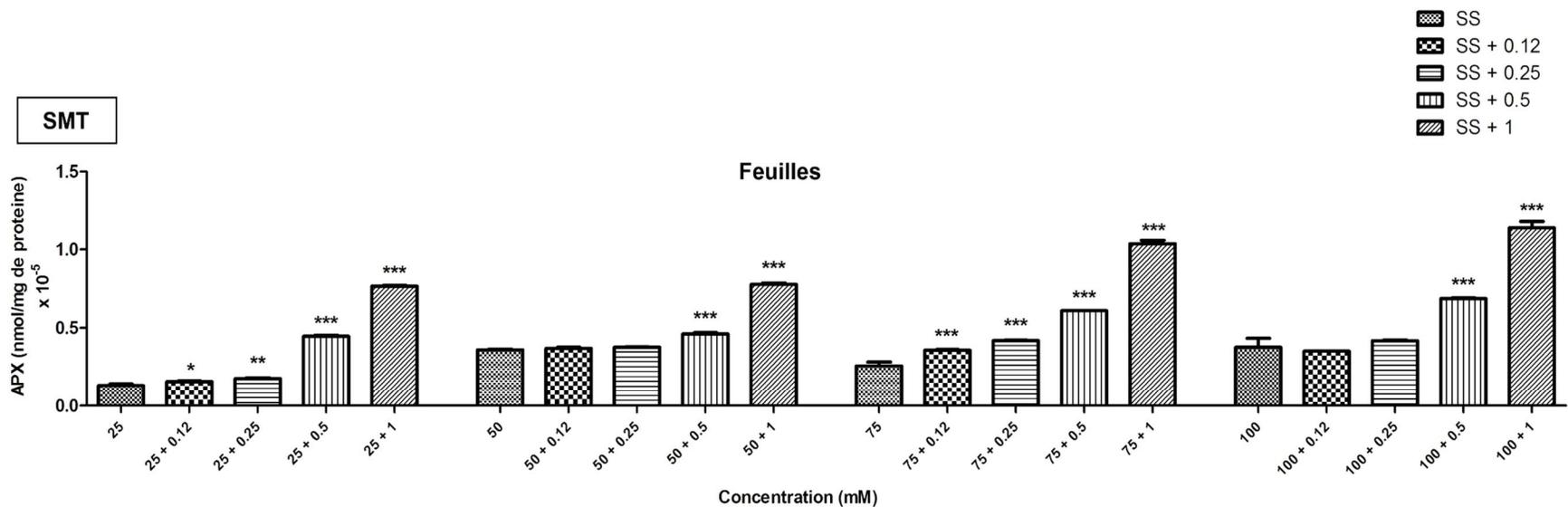


Figure 70. Effet de Zinc sur l'activité de l'ascorbate peroxydase (APX) dans les feuilles de la variété *Sémito* soumise au stress salin

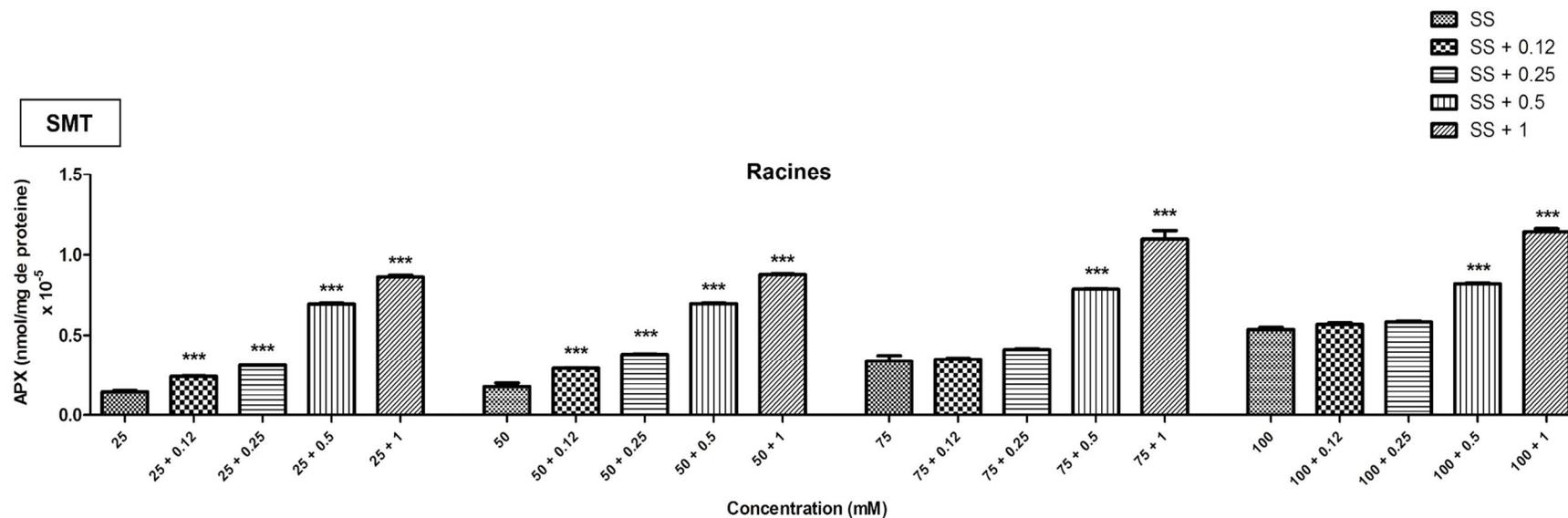


Figure 71. Effet du Zinc sur l'activité de l'ascorbate peroxydase (APX) dans les racines de la variété *Sémito* soumise au stress salin

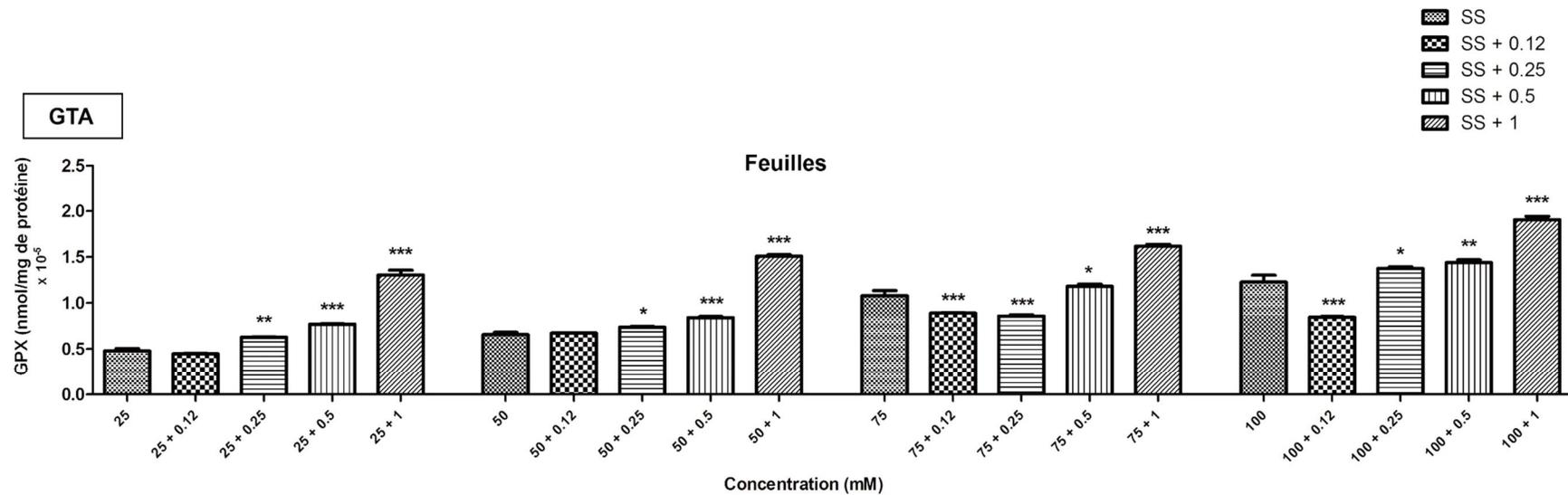


Figure 72. Effet du Zinc sur l'activité de gaïcol peroxydase (GPX) dans les feuilles de la variété *GTA dur* soumise au stress salin

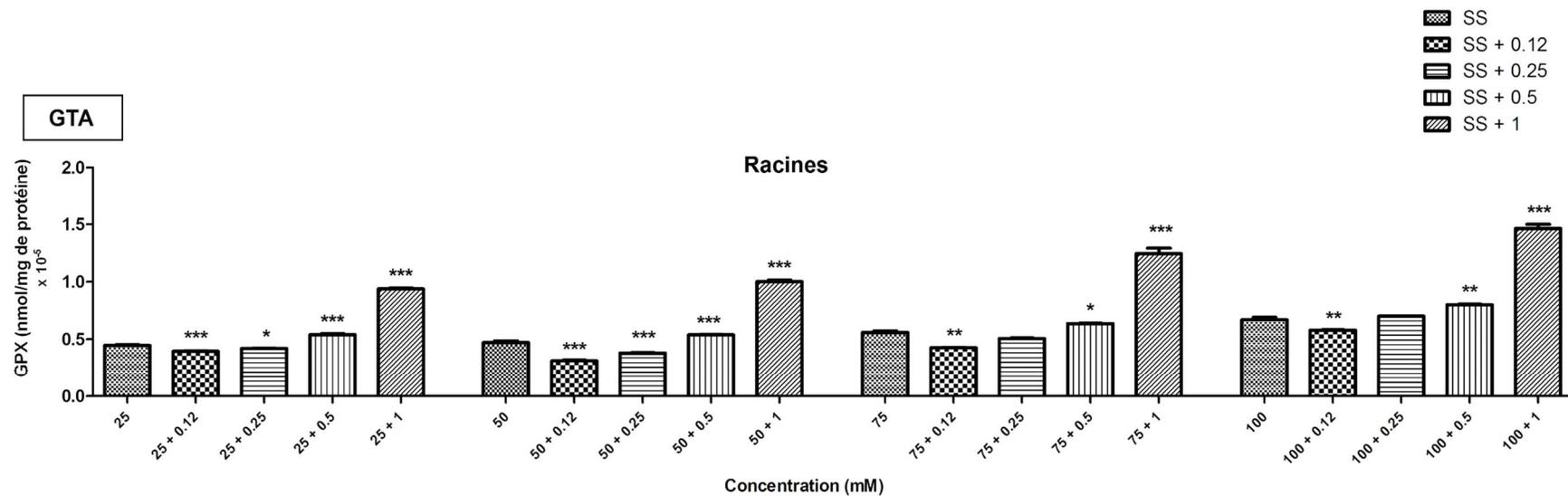


Figure 73. Effet du Zinc sur l'activité de gaïcol peroxydase (GPX) dans les racines de la variété *GTA dur* soumise au stress salin

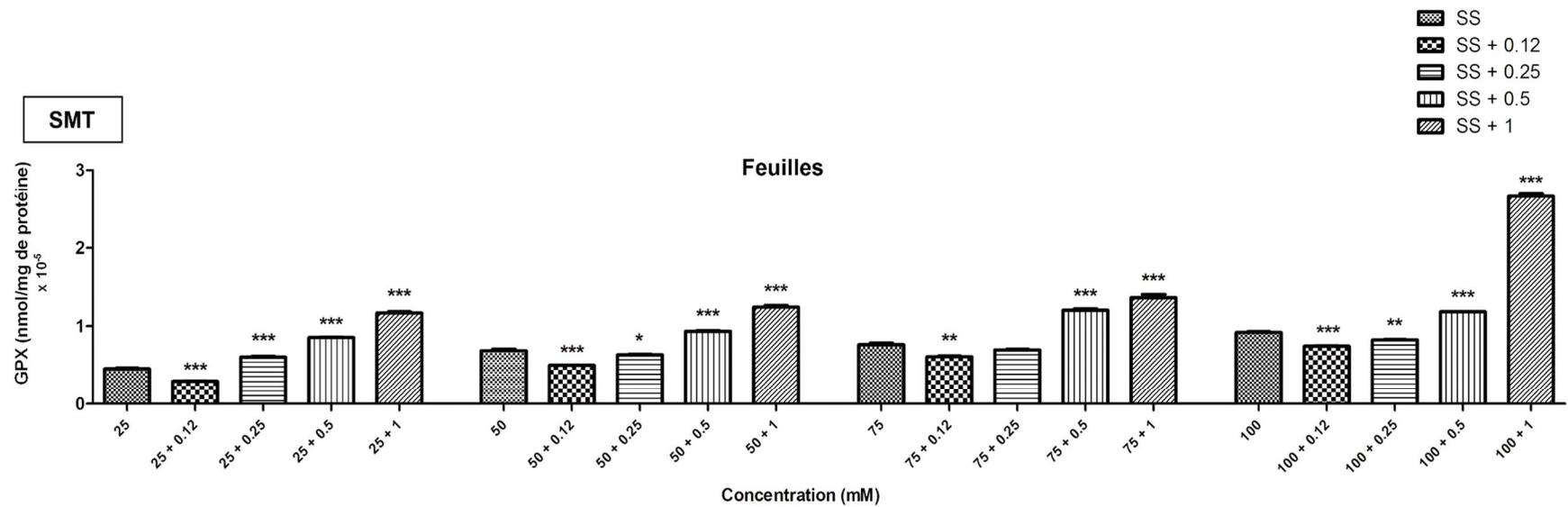


Figure 74. Effet du Zinc sur l'activité de gaïcol peroxydase (GPX) dans les feuilles de la variété *Sémito* soumise au stress salin

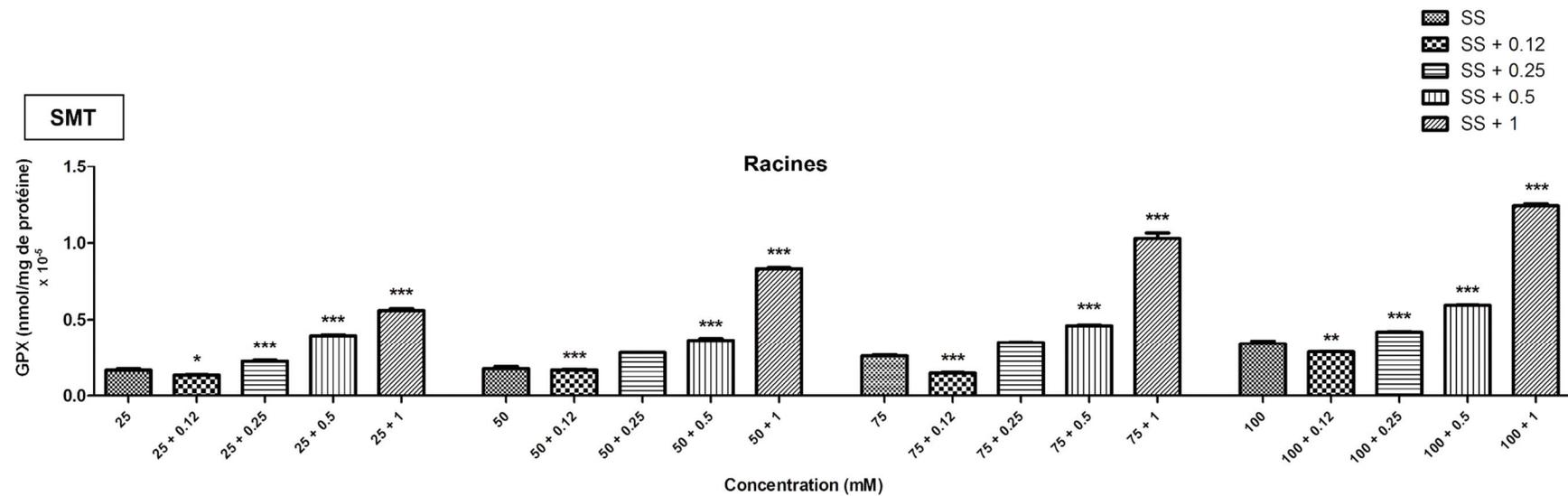


Figure 75. Effet du Zinc sur l'activité de gaïcol peroxydase (GPX) dans les racines de la variété *Sémito* soumise au stress salin

avec les fortes concentrations de stress salin (75 et 100 mM) avec le Zinc (0,5 et 1 mM), mais avec les faibles doses de Zinc (0,12 et 0,25 mM) on remarque une valeur plus au moins basse par rapport à celui enregistré chez les plantules traitées au stress salin seul, chez les deux variétés de blé dur. On enregistre une valeur de l'activité gâicol de $1,081 \cdot 10^{-5}$ avec la dose 50 mM NaCl dans les feuilles de la variété *GTA dur*, qui atteint $8,898 \cdot 10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines) et $8,594 \cdot 10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines) avec l'addition des doses 0,12 et 0,25 mM ZnSO₄ pour augmenter jusqu'à $1,619 \cdot 10^{-5}$ avec l'addition de la plus forte dose de Zinc (1 mM).

Dans les racines, on remarque que l'ajout de 0,12 mM de Zinc, enregistre une valeur de l'activité gâicol moins que celui enregistré avec le traitement au stress salin seul. Elle passe de $4,479 \cdot 10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines), $4,719 \cdot 10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines), $5,611 \cdot 10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines) et $6,705 \cdot 10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines) pour atteindre, $3,957 \cdot 10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines), $3,124 \cdot 10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines), $4,268 \cdot 10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines) et $5,808 \cdot 10^{-6}$ (nmol/min/mg protéines) avec les doses 25, 50, 75 et 100 mM NaCl respectivement.

1.2.4 Électrophysiologie

- **Mesure de potentiel membranaire des cellules corticales de la racine de blé dur**

Lorsqu'on enfonce la microélectrode dans la racine, le spot de l'écran dévie soudainement vers le bas. Le potentiel moyen enregistré par l'électrode intracellulaire dans cette solution est de $-126 \pm 2,0$ mV. Cette différence de potentiel enregistrée au moment de l'enfoncement de la microélectrode est appelée potentiel membranaire de repos. Elle est enregistrée entre les deux milieux puisque par convention le potentiel à l'extérieur de la membrane est égal à 0. Cela a permis de constater que l'intérieur de la racine est polarisé négativement par rapport à l'extérieur, polarisée positivement.

L'ajout de la solution NaCl dans le milieu induit un changement de la concentration externe de Na⁺ dans les solutions, de 0 à 50 mM, cette brusque inversion entraîne ce que on appelle une dépolarisation de la membrane, croissantes avec l'augmentation de la concentration de Na⁺. Les valeurs moyennes de dépolarisations sont comprises entre 53.89 ± 2 mV (pour un changement de concentration de Na⁺ de 0 à 50 mM). L'amplitude de la dépolarisation montre un début de saturation lorsque la concentration externe de Na⁺ augmente jusqu'à 50 mM.

L'induction de Zinc sous forme ZnSO₄ dans le milieu qui contient 50 mM NaCl, provoque une dépolarisation de valeur moyenne de -64.66 ± 3 mV (pour un changement de concentration de Na⁺ de 0 à 50 mM avec 0.1 mM Zn⁺²) (**Figure 76**).

L'augmentation de la dépolarisation lors d'ajouts de Zinc à 0.1 mM de Zn⁺² s'interprète le plus logiquement comme une augmentation des influx de sodium à haute affinité dans la racine de blé dur.

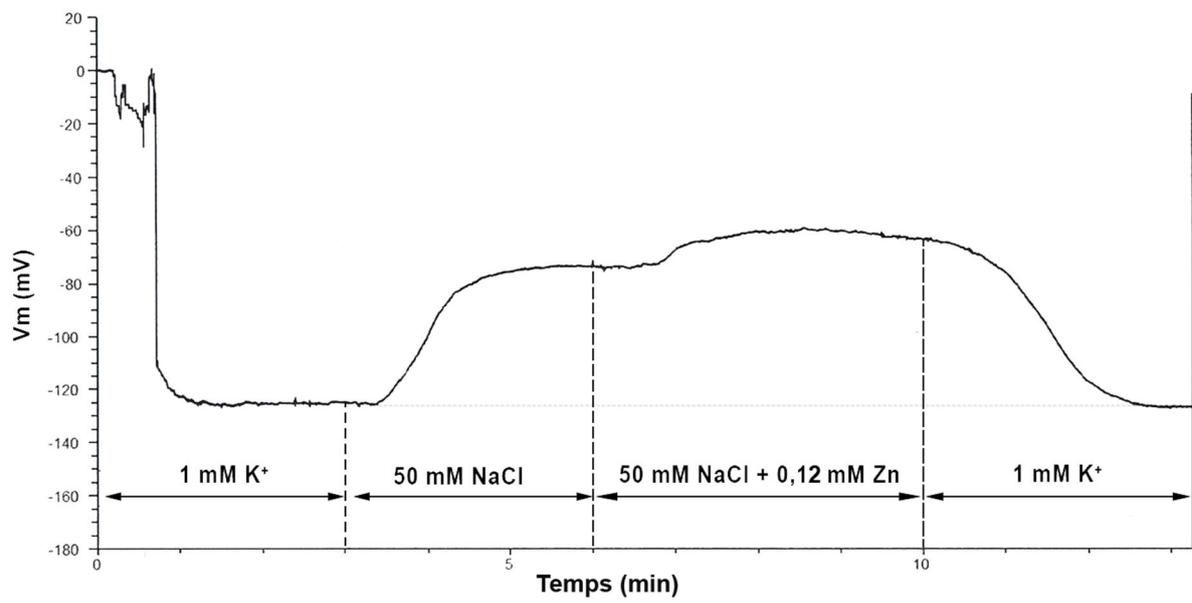


Figure 76. Potentiel membranaire de la racine de blé dur

2 Discussion

Les stress abiotiques se traduisent par des changements morphologiques, physiologiques, biochimiques et moléculaires qui affectent négativement la croissance de la plante et sa productivité (Ben nacer et *al.*, 2001 ; Wang et *al.*, 2001).

En premier lieu, nous avons étudié les réponses de deux variétés de blé dur (*Triticum durum*) *Semito* et *GTA dur* soumises au stress oxydant induit par le stress salin. Pour cela nous avons évalué différents paramètres (morphologiques, biochimiques et enzymatiques) au niveau des feuilles et des racines.

La germination est un événement critique pour le succès de l'établissement du cycle de vie des plantes ; elle prédétermine largement les chances de survie des plantules jusqu'à la maturité (Chauhan et *al.*, 2009). La réponse des graines à la salinité pourrait être un indicateur de tolérance des plantes au sel pour les stades ultérieurs du développement (Misra, 2004).

Nos résultats montrent clairement que les graines des deux génotypes de blé dur (*Triticum durum*) germent mieux en absence du sel ou dans un milieu à faible concentration de NaCl. Ces résultats sont en accord avec ceux de Haouari et *al.*, (2013), qui concluent que les graines de blé sous stress salin connaissent une réduction de la teneur en eau en augmentant la concentration en sel ce qui induit l'inhibition de la germination des graines.

Certaines études ont montré que l'augmentation de la concentration des sels retarde la germination (Askri et *al.*, 2007), et réduit le pourcentage final de germination (Othman et *al.*, 2006 ; Askri et *al.*, 2007 ; Bouda, 2011 ; Yousofinia et *al.*, 2012 ; Mrani Alaoui et *al.*, 2013 ; El Goumi, 2014 ; Ndiaye et *al.*, 2014 ; Djerah, 2015). Cette diminution est due selon Othman et *al.*, (2006), à la réduction de l'utilisation des réserves des grains. Hadas (2004), montre que le sel empêche l'imbibition de la graine en ralentissant le mouvement de l'eau. Boukraà et *al.*, (2013), indiquent que le sel réduit le taux de germination des graines de pois chiche. De nombreuses études portant sur la germination dans des conditions de stress salin indiquent que les graines de la plupart des espèces végétales atteignent un niveau maximal de germination dans l'eau distillée (Bouda, 2011 ; Alatar, 2011).

Pour cette raison on peut conclure, que l'effet de sel sur la germination des grains de blé dur est basé en majorité sur l'effet osmotique car celui-ci abaisse le potentiel osmotique du milieu de germination (à cause de la concentration élevée en sel). En effet, avec les doses élevées en sel, la proportion d'osmoticums pénétrant les structures de germination n'est pas suffisante à assurer l'imbibition de la graine en conditions de très faibles potentiel osmotique du milieu (Bouda, 2011). Ce faible potentiel externe entraîne une inhibition de l'activité enzymatique des graines et retarde la sortie et le développement de la radicule et par conséquent la germination (Gill et *al.*, 2003). L'accumulation des sels notamment le NaCl entraîne une toxicité des tissus et celle-ci empêche la

sortie de radicule indispensable pour l'approvisionnement en eau nécessaire à la croissance (Marambe, 1995). Mais on peut dire qu'au moins une partie des effets de stress salin a été occasionné par la toxicité ionique. Redmann (1974) rend l'effet de la salinité sur la germination seulement sous l'effet de la toxicité ionique sans prendre en considération l'effet osmotique. Dans des conditions salines, la compétition et l'interaction entre ions provoquent le déséquilibre nutritionnel. Les ions Na^+ réduisent la disponibilité en ions Ca^{+2} et K^+ ainsi que leur transport aux différentes parties de la plante, ce qui affecte la structure et la composition des organes végétatifs et reproductifs (Cerdà, 1988). La présence du NaCl autour des graines entraîne la dégradation de certaines protéines spécifiques impliquées dans la germination et la croissance des racines et des tiges (Khan, 2003).

Pour le taux de germination plusieurs auteurs comme (Mallek, 1998 ; Johanna, 2006) ont utilisé ce paramètre comme critère de la sélection pour la résistance à la salinité puisque la variété tolérante donne un taux raisonnable de germination dans les concentrations élevées. À l'étape finale de germination, l'inaptitude des graines à germer semble signifier qu'avec l'augmentation de la concentration en sel, l'effet de toxicité domine, suite à l'accumulation du Na^+ dans l'embryon (Guerrier, 1983), installant une inhibition osmotique (Bliss et *al.*, 1986). Cette toxicité serait influencée directement par le Na^+ (El-neimi et *al.*, 1992) ou consécutive à une carence minérale comme K^+ (Guerrier, 1984) et au caractère hormonal de l'inhibition (Ackerson, 1984) par exemple l'acide abscissique se métabolise sous l'action de Na^+ , a propriété identique à celle du NaCl. Cet ABA inhibe notamment la synthèse des enzymes (ou d'acide nucléiques) spécifiques de la germination (Black, 1983), limite l'absorption d'eau et contrôle la régulation de la pression osmotique cellulaire (Lepage-Degivry, 1988).

Selon Botia et *al.* (1998), le sel retarde la germination, ce retard serait dû à l'altération des hormones et des enzymes de la graine. L'enzyme la plus impliquée dans le processus de germination des plantes est l' α -amylase, elle est inhibée par le stress salin en altérant sa structure (Saboury, 2000). Chez *Abelmoschus esculents* L., par exemple, le pourcentage final de germination est réduit par 20% en présence de fortes concentrations salines (Ben Dkhil, 2010). La diminution de germination serait reliée à la salinité en induisant un déséquilibre des processus métaboliques aboutissant à la formation des composés phénoliques (Ayaz et *al.*, 2000).

Ces remaniements ioniques et hormonaux présument que l'embryon à l'état de quiescence, exprime une incapacité à déclencher des fonctions métaboliques en présence des hautes concentrations en sels pour utiliser les produits de dégradation venant des réserves de l'albumen. Ces métabolites, en priorité des composés glucidiques (Bourdu, 1983) et azotes fonctionneraient comme des régulateurs osmotiques potentiels lors d'un stress salin (Kayani et *al.*, 1990 ; Chunhui Wu et *al.*, 2011). Ce fonctionnement marquant les premières manifestations embryonnaires, suite

à une entrée d'eau, impliquerait le passage d'un développement embryonnaire à celui germinatif et le contrôle des mécanismes cellulaires et membranaires mis en jeu dans la germination (Missra et al, 1984).

La relation de la germination avec la salinité reste un phénomène toutefois fort complexe, hormis la caractérisation que nous venons d'établir à partir des quelques paramètres classiques, en raison de l'intervention possible d'autres facteurs telle qu'une dormance embryonnaire (Mairon, 1987 ; Attia, 2007), renforcée par la présence des sels, qui n'est d'ailleurs pas à exclure.

Les premiers résultats sur la germination ne suffisent pas à concevoir une hiérarchie de comportement du matériel végétal étudié vis-à-vis de la salinité. La tolérance au stress salin demeure la résultante de nombreux mécanismes adaptatifs fonctionnels durant la vie de la plante. Il est reconnu par certains auteurs que cette tolérance change avec le stade. Pour Chunhui Wu et al., (2011) elle varie dans le même sens pendant la germination et la croissance de la plante mais (Guerrier, 1983 ; Gholamin, 2011) trouve que la sensibilité des végétaux comme le pois et l'haricot à la salinité est plus grande pendant la phase de développement, et devient plus faible lors de la germination à forte teneurs en sels, par contre pour Scikh (1986) et Johanna (2006), la tolérance est plus grande durant la phase adulte.

Pour s'adapter au stress salin, la plante peut éviter les dommages par la réduction de la croissance (Yeo, 1983 ; Zhu, 2002 ; Benmahioul et al, 2009), c'est l'effet le plus commun des stress abiotiques sur la physiologie des plantes. La réduction de la croissance est une capacité adaptative nécessaire à la survie d'une plante exposée à un stress abiotique. En effet, ce retard de développement permet à la plante d'accumuler de l'énergie et des ressources pour combattre le stress avant que le déséquilibre entre l'intérieur et l'extérieur de l'organisme n'augmente jusqu'à un seuil où les dommages seront irréversibles. La croissance est inversement corrélée à la résistance au stress salin d'une espèce / variété (Bois, 2005).

Certains chercheurs ont noté que la réduction de la croissance, sous l'effet du stress salin, peut avoir lieu sans signes de toxicité (Levy, 199 ; Walker et al. 1982) quant à eux, suggèrent que la diminution de la croissance (exprimée par la capacité photosynthétique) pourrait être en relation avec une perte de turgescence. Chez *Citrus aurantium*, cette diminution serait principalement due à l'effet osmotique de la salinité (Ruiz et al., 1999 ; Roy et al., 2004). Par contre, d'autres études ont montré que la diminution de la turgescence n'est pas la cause de la réduction de la croissance (Fernandez-Ballester et al., 1998 ; Gaufichonet et al., 2010). On peut exclure que l'effet inhibiteur de NaCl sur leur croissance est basé seulement sur la perturbation de leur alimentation en eau mais celle - ci reste l'une des principales causes de la diminution de croissance.

Selon les résultats de plusieurs recherches (Elmouhacen, 2006 ; Fernandez- Ballester et al., 1998 ; Gaufichonet et al., 2010 ; Choukri et al., 2011) qui sont réalisées au niveau du stress salin

sur la croissance végétale on peut citer les principaux effets inhibiteurs de NaCl dans les points suivant :

- La sécheresse physiologique sous l'effet du stress salin (l'absorption insuffisante de l'eau sous l'effet de la concentration élevée en sel qui assure une diminution du potentiel hydrique du sol et à l'autre cote l'augmentation de la transpiration).

- Stress ionique ou toxicité ionique sous l'effet de l'accumulation de certains ions non organique comme Na⁺ et Cl⁻ (Turan et *al.*, 2007; Taffouo et *al.*, 2010).

- Le déséquilibre ionique, ou la déficience de la nutrition minérale dans le tissu de la plante. Inhibition de l'élongation cellulaire notamment les cellules apicales (Munns et *al.*, 1982).

Dans notre travail, Le stress salin s'il influe sur la croissance en longueur des parties aériennes de *Semito* et *GTA dur*, il influe aussi sur leurs parties souterraines. La diminution de la longueur des racines est plus remarquable pour la variété *GTA* par rapport à la variété *Semito* même avec le traitement à la plus faible dose de traitement.

La racine et l'augmentation de la pousse sont réduites abruptement chez les plantes sensibles au sel et cet effet ne parait pas dépendre de la concentration des ions dans les tissus en croissance, mais c'est plutôt une réponse à l'osmolarité de la solution externe (Munns, 2002).

La caractérisation du statut hydrique d'une plante pourrait passer par la seule évaluation de la teneur relative en eau. Clarke et Mc Craig, (1982) attirent l'attention sur l'utilisation de la teneur relative en eau comme indicateur de l'état hydrique de la plante sous stress. Scofield et *al.*, (1988) notent que la teneur en eau diminue lorsque le stress augmente, mais elle diminue plus vite chez les variétés sensibles que chez les variétés résistantes. La TRE en plus de sa relation avec le volume cellulaire reflète plus précisément la balance entre l'eau disponible dans la feuille et le taux de transpiration, le potentiel osmotique et de turgescence (Nouri, 2002).

El Hakimi et *al.*, (1995) montrent que cette caractéristique présente un coefficient d'héritabilité élevé et qu'elle se fixe rapidement chez les lignées en ségrégation d'un croisement donné. Ainsi, les variétés tolérantes au stress, sont celles qui sont capables de perdre le moins d'eau par unité de temps et unité de surface, sous stress. Ceci indique que la plante utilise divers mécanismes pour résister au stress salin ce résultat est en accord avec les résultats de (Bissati et *al.*, 2011).

La présence de stomates, ensemble de cellules épidermiques spécialisées délimitant un poreostiole mettant en relation le milieu interne d'un organe végétal et l'atmosphère environnante, est une adaptation à la vie terrestre des végétaux supérieurs permettant la régulation des échanges gazeux de CO₂ et de vapeur d'eau. Actuellement les mécanismes mis en œuvre à l'échelle des cellules stomatiques pour contrôler l'ouverture des stomates sont bien établis. L'ouverture et la fermeture des stomates dépendent de la différence de pression de turgescence

entre les cellules de garde et les cellules voisines (Franks et *al.*, 1998 ; Franks et *al.*, 2001 ; Bissati et *al.*, 2011). Les facteurs environnementaux qui induisent cette réponse et la façon dont les cellules stomatiques perçoivent ces signaux restent mal connus (Franks, 2003).

L'observation des contenus chlorophylliens (a), (b), et caroténoïdes, montre que toutes les variétés ont été affectées d'une manière négative par stress salin. En effet, la plus forte dose appliquée (100 mM) de NaCl (stress sévère) a réduit le contenu en chlorophylle (a), chez les deux variétés étudiées. Signalons en outre, que cette même concentration a induit une chute plus prononcée chez la variété *GTA dur*. Concernant la chlorophylle (b) et les pigments caroténoïdes, on a noté également un effet identique, c'est-à-dire, diminution des contenus chez toutes les variétés traitées avec les solutions salines, précisément chez la variété *Semito*. Ces résultats sont en accord avec d'autres travaux déjà réalisés par El Ikhlil, (2001), Cheikh M'hamed, (2008) et Tahri, (1998). L'explication plausible de la réduction des pigments photorécepteurs, notamment chlorophylle (a), (b) et caroténoïdes est donnée par Tewari, (1991), comme étant une sensibilité des végétaux au sel (NaCl) pendant une étape de la biosynthèse de la chlorophylle ; signalons par ailleurs, que la chlorophylle (b) a été moins affectée que la chlorophylle (a). Dans le même ordre d'idées, le stress salin ou l'irrigation des plantes par des eaux salines provoque une altération du processus photosynthétique. La photosynthèse est nettement réduite par la fermeture des stomates et éventuellement la diminution de la conductance du mesophylle foliaire, causée par la perte de turgescence et la dégradation des membranes cellulaires. Ce qui entraîne un frein à la diffusion du CO₂ dans les feuilles, ou encore la toxicité de certains ions du sel (Na⁺, Cl⁻) qui engendrait une sénescence avancée des tissus, et aussi la baisse de l'activité enzymatique causée par le changement de la conformation de la structure des enzymes (Iyengar, 1996).

Les teneurs en caroténoïdes chutent en présence de NaCl (2,73 et 6,88 fois chez *GTA dur* et *Semito* respectivement). Ces derniers sont impliqués dans la protection du système photosynthétique vis-à-vis de l'endommagement oxydatif causé par la salinité (Gadalla, 2009). La réduction de caroténoïdes aurait un effet dans la diminution des teneurs en chlorophylles a, b et totale. *S. vermiculata* et *Streptomyces* améliorent les concentrations en caroténoïdes, suite à l'induction probable de certaines enzymes impliquées dans leur synthèse.

L'évolution de la teneur en protéines dans la partie aérienne chez les deux variétés a connu une réponse variable au sein des plantules des deux variétés, si *Semito* affiche une réduction non significative en fonction de l'intensité du stress après 3 jours de traitement, on assiste cependant à une diminution très hautement significative des protéines chez *GTA dur*. La réduction de la teneur en protéines solubles sous l'effet du stress salin est signalée par plusieurs auteurs parmi lesquels André (2004), dans leurs travaux sur le sorgho ; Khosravinejad et *al.*, (2009), dans leurs travaux sur deux variétés d'ogre (Afzal et EMB2-12) ; Amini (2007), dans leurs travaux sur la variété de

tomate (Shirazy). Ces auteurs rapportent que la salinité induit la diminution de certaines protéines solubles et que cette variation de la teneur en protéines ne confère pas forcément à la plante une tolérance au stress salin.

La diminution de la teneur foliaire en protéines solubles sous stress salin serait en partie due à l'effet inhibiteur de NaCl sur la nodulation et sur la fixation symbiotique de l'azote (Del Río and *al.*, 2006). Plusieurs auteurs rapportent que l'altération de la diffusion intra-nodulaire de l'oxygène (Dynowski and *al.*, 2008) et l'inhibition de l'activité enzymatique de la glutamine synthétase (GS) et la glutamate synthase dépendante de NADH (NADH-GOGAT) (Joo and *al.*, 2001 ; Del Río and *al.*, 2006 ; Armada and *al.*, 2014) sous la contrainte saline sont parmi les facteurs limitant la biosynthèse protéique.

Les Sucres totaux solubles ont aussi connus une augmentation de la concentration en repense au stress salin. Les deux variétés ont confronté le stress salin par une forte accumulation de sucres solubles foliaire par rapport à celui des racines. Cette accumulation plus forte chez *GTA dur*, la confère une relative performance par rapport à *Semito* cette différence d'un génotype à l'autre selon leur réaction vis-à-vis la salinité ce résultat sont en accord avec les résultats de (Zerrad et *al.*, 2006) et (Ottow et *al.*, 2005). Plusieurs auteurs comme Ashraf (1995), avaient montré que les sucres solubles s'accumulent chez des variétés de tournesol qui diffèrent selon leur degré de tolérance à la salinité, mais également ils ont constaté que les variétés tolérantes accumulent des proportions plus importantes de sucres que celles des variétés sensibles.

Les sucres sont considérés par plusieurs auteurs comme de bons osmoregulateurs (Kameli ,1995 ; Sanchez et *al.*, 1998) qui peuvent jouer un rôle important dans l'ajustement osmotique et l'adaptation des plantes au stress osmotique (Morgan,1984 ; Zhang et *al.*, 1999 ; Gamal et *al.*, 2012).

En effet les sucres, même s'ils représentent des osmotocums beaucoup moins puissant, ils participent eux également au maintien de la balance de la force osmotique pour garder la turgescence et le volume cytosolique aussi élevés que possible (Cherif et *al.*, 2001), et permettent également une préservation de l'intégrité membranaire dans les organes stressés ainsi que une protection des protéines (Darbyshir, 1974 ; Ge and *al.*, 2012).

Il est possible que ces modifications dans les teneurs en sucres, induites par le sel, constituent un test commode de prédiction de la résistance au sel des espèces au niveau variétal.

La proline, de teneur habituellement faible dans les tissus des plantes cultivées sur milieu dépourvu de sel et donc peu contraignant sur le plan hydrique, se trouve accumulée de façon spectaculaire en réponse au stress salin.

Dans notre travail le stress provoque une augmentation de la teneur en proline, mais le taux d'augmentation reste corrèle avec le génotype, le même résultat est trouvé par (Grennan, 2006 ;

Lugan, 2008), les teneurs les plus élevées sont enregistrées chez la variété *GTA dur*. Plusieurs auteurs dont Khedr et al, (2003) ; Claussen (2005) et Debnath et al, (2008), avaient mentionné que cet acide aminé fait partie des osmotocums que les plantes synthétisent une fois exposées au stress hydrique ou salin. Son rôle est nécessaire pour l'ajustement osmotique pour équilibrer le potentiel osmotique du sol conformément à ce qui a été démontré par d'autres travaux dont ceux de Gadallah (1999) et de Demir (2000). Elle pourrait, également, intervenir dans la régulation du pH cytoplasmique ou constituer une réserve d'azote utilisée par la plante postérieurement à la période de stress (Tal, 1979). Par contre une forte accumulation de cet acide aminé est un signe de perturbation métabolique (Cheikh M'hamed et al., 2008). Son accumulation a été démontrée chez de nombreuses espèces et dans différentes situations de stress (salin, hydriques, thermiques) (Blum, 1976 ; Huang, 1979 ; Hubac, 1980 ; Dorfling, 1989 ; Ober, 1994 ; Gamal et al., 2012). Certains auteurs (Singh et al., 1973) et (Grennan, 2006) pensent que les quantités accumulées pourraient être liées au niveau de tolérance aux stress.

La proline accumule en plus grandes quantités que d'autres acides aminés dans les plantes stressées au sel (Abd El-Samad et al., 2011; Taie et al, 2013; Abdelhamid et al., 2013 ; Sadak and Mostafa, 2015). Cette accumulation peut être le résultat de trois processus complémentaires : stimulation de sa synthèse (Morris et al., 1969 ; Boggess et al., 1976), inhibition de son oxydation (Stewart et al., 1977 ; Rayapati, 1991) et/ou altération de la biosynthèse des protéines (Stewart et al., 1977).

On a trouvé aussi dans cette étude que l'augmentation de la teneur en proline foliaire sous l'effet du stress, une baisse dans les teneurs en pigments chlorophylliens totaux a été, en revanche, enregistrée. Cette diminution est plus marquée chez les génotypes qui ont des teneurs élevées en proline (*GTA dur*) par rapport à celles qui ont des teneurs en proline faibles (*Semito*). Les résultats illustres dans ce travail montrent une certaine proportionnalité, mais inverse, entre les teneurs en proline accumulées et les teneurs en pigments chlorophylliens perdues par chacun des génotypes étudiés, la variété qui accumule plus de proline présente une forte diminution de ses teneurs en pigments chlorophylliens et vice versa. Ces résultats suggèrent l'existence d'une corrélation vraisemblable entre les voies de biosynthèse des pigments chlorophylliens et de la proline (Yang et al., 2002). Une compétition entre ces deux composés sur leur précurseur commun, le glutamate, peut être à l'origine de cette évolution (Bengston et al. 1978 ; Reddy, 1991 ; Chokri et al., 2011) et (Morant-Manceau et al., 2004 ; Lugan, 2012).

Dans notre travail, la nutrition minérale se trouve fortement affecté par la contrainte saline. Le sodium s'accumule chez les deux variétés *GTA dur* et *Semito* au niveau des feuilles, d'une façon croissante avec l'augmentation de la concentration en sel. L'effet du sel sur l'accumulation du sodium est très marqué, car les variations par rapport aux témoins sont hautement significatives.

L'accumulation de Na^+ en conditions de stress salin dans la partie aérienne a été aussi rapportée par plusieurs auteurs Navarro (2006). D'après Bouaouina et *al.*, (2000), l'accumulation cellulaire de Na^+ chez le blé augmente avec la concentration de NaCl .

Chez les plantes de types « incluser », le flux de sodium est essentiellement ascendant et le sel est accumulé dans les parties aériennes au niveau des vacuoles. Par contre, chez celles de types « excluser », la plus grande partie du sodium absorbé et véhiculé vers les feuilles est réexportées vers les racines via le phloème (Berthomieu et *al.*, 2003) ou initialement stockée dans les racines. La compartimentation du NaCl dans les vacuoles représente le mécanisme principal de détoxification du sel chez les halophytes (Bosrsani et *al.*, 2003 ; Ksouri et *al.*, 2010), tandis que les glycophytes ont recours au mécanisme d'exclusion du sodium des cellules (au niveau de la membrane plasmique) des parties aérienne vers les racines (Blumwald et *al.*, 2000). En effet, certaines glycophytes, comme le cotonnier ou l'orge, transporte et accumulent de grandes quantités de Na^+ dans les feuilles (Hassani et *al.*, 2008).

Le potassium joue un rôle dans le contrôle de la turgescence cellulaire (Sairam, 2004), contribue également dans la réduction du potentiel osmotique des cellules racinaires pour faciliter les processus de transport des solutés. Par conséquent, le maintien d'un niveau de K^+ adéquat est essentiel pour la survie de la plante dans les milieux salins.

Les traitements salins appliqués ont eu un impact semblable chez les deux variétés sur les teneurs en potassium. Chez les deux variétés, la salinité du milieu a pour effet de diminuer les teneurs en K^+ des organes végétatifs, ces résultats sont en accord avec les travaux de Levitt (1980) et Houala (2007). Selon les auteurs, l'absorption de K^+ varie en fonction de la concentration du sel appliquée : elle augmente en présence de faibles dose de Na^+ , diminue et peut même s'arrêter avec les fortes concentrations.

Ouerghi et *al.*, (2000) ; Mezni et *al.*, (2002) notent que le NaCl entraîne une diminution des teneurs en K^+ . Dans le même contexte, Ould El Hadj-Khalil (2001) signale que les teneurs en K^+ sont diminuées dans les plantes de tomate cultivées en présence de NaCl à 50 mM et en présence de NaCl à 100 mM.

La teneurs en K^+ diminue fortement dans les organes et rapporte que cette diminution est reliée avec la forte augmentation de la teneur en sodium. Ce phénomène a été expliqué par une interaction comparative entre le Na^+ et le K^+ et l'inhibition de la rétention du potassium en présence de forte concentration de Na^+ (Bernstein et *al.*, 1993). L'effet inhibiteur du traitement salin sur l'absorption de K^+ a été observé chez le blé tendre (Clarcke et Mac Caig, 1989) et l'olivier (Ottow et *al.*, 2005).

La conséquence finale d'un déséquilibre éventuel des facteurs environnementaux défavorables est l'augmentation rapide de taux des ROS intracellulaires (sharma and *al.*, 2012), en

particulier, H₂O₂. Par conséquent, l'équilibre entre la production de ROS et de nettoyage est très important (Appel, 2004). L'ascorbate peroxydase (APX), la glutathion peroxydase (GPX), et catalase (CAT), représentant les principaux mécanismes enzymatiques de fixation de l'H₂O₂ chez les plantes, est essentiellement pour la suppression des H₂O₂ toxiques dans une cellule (Appel, 2004). Un niveau élevé de H₂O₂ inhibe directement la fixation du CO₂ (Yamazaki et al., 2003).

Dans notre travail, les deux génotypes de blé dur, ont une tendance similaire. L'activité CAT a augmenté avec l'augmentation du stress salin, mais elle était plus élevée chez la variété *GTA dur* que chez la variété *Semito*. Dans les feuilles et les racines de tomates, l'activité CAT a augmenté dans les plantes soumises à différents degrés de stress salin par rapport aux témoins, alors que chez d'autres espèces, comme les pois, l'activité CAT dans feuilles n'a pas augmenté en réponse à la salinité (Corpas and al., 1993 ; Mittova and al., 2003 ; Mittova and al., 2004). Gondim et al., 2012 ont évalué les effets de H₂O₂ pulvérisé sur la partie foliaire sur la croissance de la plante. L'expérience a révélé que H₂O₂ pulvérisé augmente l'activité des enzymes antioxydants, et que l'activité CAT était le plus sensible de ces enzymes à l' H₂O₂. L'augmentation de l'activité CAT apparaît liée à la régulation de l'expression des gènes, et aux dommages oxydatifs détecté dans les plantes ayant une activité de CAT plus élevé.

Ascorbate peroxydase est l'un des principaux systèmes d'élimination des ROS, qui joue un rôle important dans l'amélioration de la tolérance à la salinité chez les plantes, la détoxification de H₂O₂ dans différents compartiments cellulaires, être impliqués dans l'homéostasie de l'ASA, et en équilibrant le réseau intracellulaire des ROS (Diaz-Vivancos and al., 2013 ; Hernández and al., 2000 ; Hernández and al., 2001).

Dans ce système de détoxification, la transformation de H₂O₂ en eau et en oxygène se fait en présence de l'ascorbate qui joue le rôle de donneur d'électrons. Au cours de la première réaction catalysée par l'ascorbate peroxydase, l'ascorbate est transformé en monodéhydroascorbate et/ou déhydroascorbate (Souguir, 2009). Nos résultats ont montré une augmentation significative de l'activité ascorbate peroxydase dans les racines et les feuilles des deux variétés traitées. De nombreux travaux sont en accord avec nos résultats (Bonifacio and al., 2011 ; Siddiqui and al., 2011 ; Tuna and al., 2013 ; Mittova and al., 2015).

En outre, dans une étude de signalisation de stress, exploite le pouvoir de réduction chez l'acide ascorbique pour se débarrasser de H₂O₂ ; potentiellement dangereux, à la réponse au stress abiotique (Hertwig et al., 1992, Jebara et al., 2005, Siddiqui et al., 2008, MAJEED et al., 2010 ; Siddiqui et al., 2013)

La guaïacol peroxydase (GPX) est aussi une enzyme importante capable d'éliminer le H₂O₂. L'activité GPX est suggérée comme un biomarqueur d'une toxicité d'un métal dans les plantes (Agawal et al., 2004). Selon nos résultats, nous avons constaté que le stress salin provoque une

augmentation significative de l'activité gaïacol peroxydase au niveau racinaire et foliaire des plantes des deux variétés.

La deuxième source de stress abiotiques qui peuvent induire un stress oxydatif chez les plantes, on a opté pour étudier la toxicité des métaux, l'un des principaux problèmes environnementaux en raison de leurs augmentation à cause de des sources naturelles et les activités humaines (Thounaojam et *al.*, 2012). Parmi les métaux, le Zinc (Zn), qui est l'un des micronutriments essentiel requis pour de nombreuses enzymes impliquées dans de nombreux processus physiologiques et métaboliques de plantes. Le Zinc est également connu pour avoir un effet de stabilisation et de protection sur la biomembrane contre les dommages oxydatifs et de peroxydation, la perte d'intégrité de la membrane plasmique et également altération de la perméabilité de la membrane (Bettger, 1981). En outre, le Zinc peut atténuer autre stress oxydatif induit par le métal (Aravind, 2003 et Upadhyay, 2010). Toutefois, l'excès de Zn dans les organismes peut conduire à une toxicité y compris inhibition de la croissance, les déséquilibres nutritifs, la chlorose des feuilles et la photosynthèse dépréciation (Hassan, 2011, Todeschini et *al.*, 2011 et Cambrollé et *al.*, 2012). Ainsi, les sols contaminés Zn cause des blessures à des micro-organismes du sol, réduisent le rendement des cultures et sont donc dangereux pour les chaînes alimentaires (Hassan, 2011). Dans notre travail nous avons étudié différents paramètres pour mieux comprendre les mécanismes que le blé dur suit pour faire face au stress au Zinc.

Nos résultats ont montré que les différentes concentrations de Zinc appliquée et son excès dans le milieu, n'ont pas affectés la germination des graines, en revanche, le traitement à faible dose (0,12 et 0,25 mM ZnSO₄), la stimulé. Le travail de Marichali and *al.*, (2014), a démontré que la présence excessive de Zn n'a pas inhibé la germination des graines, mais elle a réduit la longueur des racines des semis de la coriandre, ce qui indique que Zn a des effets toxiques faibles sur la germination des graines de la coriandre, et que les racines sont plus sensibles que les graines au stress métallique.

Ces résultats sont en accord avec ceux de Martínez-Fernández et *al.*, (2011), qui a montré que 150 µM Zn n'a pas inhibé la germination des graines de *Bituminaria bituminosa* (L.). Tandis que le travail de Cicer arietinum, révèle que le Zinc à faibles concentrations (10 et 25 µM) a fortement stimulé la germination des graines, et qu'elle est inhibée au plus forte concentration (Sharma et *al.*, 2010). De point de vue physiologique, la réussite des graines de germer, peut être traduit par du fait que le Zinc n'a pas affecté l'imbibition et interfère avec l'absorption d'eau (Kranner, 2011). Cette hypothèse est soutenue par Lefevre et *al.*, (2009), qui ont montré que les graines de *Dorycnium pentaphyllum* qui ont échoué à germer après imbibition dans des concentrations élevées de Zinc et qui ne germent pas après rinçage à l'eau déminéralisée.

l'inhibition de la croissance et la réduction de la biomasse ont été observées dans d'autres plantes (Monnet et *al.*, 2001; Cambrolle et *al.*, 2011). Dans notre travail une réduction de la longueur des racines chez les deux variétés de blé a été enregistrée. La toxicité apparaît plus dans les racines des plantes plutôt que dans les feuilles parce que les racines de la plante sont l'organe qui confronte directement le stress de métal lourd. C'est résultats sont en accord avec ceux de Xiaoning et *al.*, (2012). Martínez-Fernández et *al.*, (2011), indique que la dose 76 μM a inhibée la croissance des racines et des feuilles des semis de *Bituminaria bituminosa* (L.). Nos résultats sont en accord avec Lefevre et *al.*, (2009) et Ozdener, (2009) qui ont rapporté des résultats similaires dans *Triticum aestivum*, *Dorycnium pentaphyllum* et *Eruca sativa*, respectivement. La diminution de la longueur des racines par l'excès de Zinc, peut être traduite par l'inhibition de la prolifération cellulaire et l'allongement ultérieur (Michael, 2011). Les études de Finger-Teixeira et *al.*, (2010) et Li et *al.*, (2012), ont révélé que la réduction de la croissance des racines est liée à une perte importante de la viabilité cellulaire dans les pointes des racines et à une augmentation du niveau de lignification dans des semis de blé exposé aux fortes concentrations de Zinc.

Dans la présente étude, la toxicité du Zinc a réduit la teneur relative en eau des feuilles et les racines. Selon Prasad, 2004, l'excès de Zn^{2+} peut interférer avec l'équilibre de l'eau en endommageant les membranes plasmiques, diminuant les transporteurs d'eau, et affectant les taux de transpiration des tissus végétaux. La réduction de la teneur relative en eau, pourrait être le résultat de la diminution de la conductivité hydraulique de la racine ou diminution du débit d'eau des racines vers les feuilles (Sobhanian and *al.*, 2011 ; Koussevitzky and *al.*, 2008). Des résultats similaires sur l'effet des métaux lourds sur la TRE sur le blé et le maïs ont été enregistrés (Bauwe and *al.*, 2012). L'effet de l'arsenic comme un métal lourd a eu des résultats similaires sur les haricots (De Pinto and *al.*, 2013). Une réduction de la teneur relative en eau (TRE) dans les feuilles indique la diminution de la pression du gonflement dans des cellules végétales. Par conséquent, le potentiel hydrique de la plante sera réduit afin de maintenir le taux de transpiration stable (Karam et *al.*, 2006).

Nos résultats ont également montré que Chl (b) était plus sensible à l'excès de Zn que la Chl (a). c'est résultats sont en accord avec les résultats de Li et *al.*, (2013), qui ont déclaré que la réduction de la teneur en Chl (b) des plantules de blé comme réponse à l'excès au Zn, était plus prononcée que celle de Chl (a). Ils attribuaient que la perte de Chl (b) est du à son hydrolyse plus rapide par rapport à Chl (a). En général, la diminution de la concentration en chlorophylle est considéré comme l'un des premiers symptômes de toxicité au Zinc dans les plantes (Di Baccio et *al.*, 2009). La chlorose des feuilles âgées et qui est considérée comme une réponse générale à la toxicité au Zn dans les plantes, peut être attribuée à la déficience en P (Di Baccio et *al.*, 2009; Azzarello et *al.*, 2012). Ces auteurs ont également montré que l'excès de Zn induit des

changements ultrastructuraux et physiologiques dans les feuilles y compris l'augmentation significative de l'épaississement de la lamina foliaire, la diminution de nombre de chloroplastes et faisceaux vacuolaires, le retrait de la membrane plasmique et la perturbation de la conformation du photosystème II (PSII complexe de base), conduisant ainsi à l'activité photosynthétique réduite et une diminution significative consécutive dans l'assimilation nette de CO₂ (Azzarello et al., 2012).

L'accumulation des osmolytes organiques tels que, les protéines solubles, les sucres solubles totaux et la proline est une réponse biochimique qui caractérise les plantes dans des conditions de stress (Hare, 1997).

Nos résultats ont montré que le traitement des plantules de blé dur des deux variétés de blé dur au Zinc, a enregistré une teneur en protéine soluble plus faible dans les feuilles, et plus élevée dans les racines en comparaison avec les plants non traité. C'est résultats sont en accord avec ceux de Li et al, (2013). L'étude de Zheng et al, (2009) a démontré que la protéine soluble est liée à la tolérance de métaux dans les plantes. Plusieurs études ont montré que divers métaux conduisent à une augmentation de taux des protéines solubles et la teneur des sucres solubles dans certaines plantes, et cet effet était plus significative dans les feuilles que dans les racines (Verma, 2001; Guo et al, 2007; John et al., 2008).

D'après nos résultats, on constate qu'avec l'augmentation de la concentration de Zinc, les concentrations des sucres solubles dans les feuilles et les racines des plantules de blé ont augmentés. D'après le travail de Van, (1990) il indique que les sucres solubles augmentent dans le cas de stress sous conditions de salinité, de métaux lourds et la température. L'accumulation de sucres solubles aide à réguler le stress osmotique dans les cellules végétales et conduit à la préservation de molécules biologiques et membranes (Irannejad, 2004).

Dans la présente étude, le stress au Zinc a augmenté la teneur en proline dans les feuilles et les racines des plants de blé. Des résultats similaires ont été signalés dans les semis de blé de Bassi (1993). Souvent, l'augmentation de la teneur en proline dans les feuilles est supérieure à celle dans les racines (Dietz, 2006). Contrairement aux résultats de notre étude, l'accumulation de proline dans les racines était plus importante chez les plantules des deux variétés de blé dur lorsqu'elles sont exposées aux différentes concentrations de Zn par rapport à celle des feuilles. Ce qui indique que la proline joue un rôle plus important de protection dans les racines de stress des plants de blé. L'action protectrice de la proline est supposée être liée à sa capacité à détoxifier les ROS (Tripathi, 2004) et à inhiber la peroxydation lipidique (Mehta, 1999). L'augmentation de la concentration de proline en raison de l'exposition aux métaux lourds est très répandue comme réponse chez les plantes (Tripathi, 2004 ; Michael, 2011).

Les plantes peuvent produire H₂O₂ par différents moyens de voie métabolique localisées dans différents compartiments cellulaires, tels que la paroi cellulaire, membrane plasmique, les chloroplastes, les mitochondries et les peroxysomes (Achary et *al.*, 2012).

Parmi eux, le NADH-POD est responsable de la production de H₂O₂ dans la paroi cellulaire des racines des plantes (Lin, 2001). L'activité GPx, localisé à la paroi cellulaire, a été signalé dans les plantes traitées aux métaux lourds (Achary et *al.*, 2008).

Notre travail, révèle que les activités GPx et CAT dans les feuilles de blé, ont enregistré un augmentation significative après avoir exposé les plantules à différentes doses de traitement au Zinc. Par contre dans les racines, une inhibition de l'activité GPx et une stimulation de CAT ont été observés. Nos résultats sont en accord avec ceux de Li et *al.* (2013) qui confirme que. Selon Prasad et *al.* (1999), La stimulation de la POD et CAT suggère leur rôle dans la détoxification de H₂O₂ à la toxicité de Zinc dans les plantules de *Brassica juncea*. En revanche, une diminution des activités de GPx et le CAT ont été enregistré dans les feuilles et les racines de diverses plantes comme réponse à l'excès de Zn (Jain et *al.*, 2010; Ozdener, 2010). Ainsi, les métaux lourds induisent des changements de l'activité des enzymes antioxydantes selon l'espèce et même la concentration de traitement.

Les GPx sont les enzymes primaires piégeant de H₂O₂ qui le détoxifient dans les chloroplastes et les cytosol des cellules végétales (Zhang et *al.*, 2011), et le CAT est fréquemment utilisé par les cellules pour catalyser rapidement la décomposition de H₂O₂ de l'oxygène gazeux moins réactif et H₂O (Tayefi-Nasrabadi et *al.*, 2011). Ces deux enzymes constituent système de balayage principal de H₂O₂ dans des conditions dans les cellules. Les Conditions élevées de Zn ont abouti à la stimulation des activités de GPx et de CAT dans la canne à sucre (Jain et *al.*, 2010). Selon Lin, (2001); Liskay et *al.*, (2003), l'augmentation de l'activité de GPX dans la paroi cellulaire est la cause de la réduction de la croissance des racines dans les conditions de stress.

Nos résultats ont aussi montré que les activités APX ont augmenté de manière significative dans les feuilles des semis de blé dur sous différentes concentrations de Zn. Une stimulation de l'activité APX était aussi observée dans les racines. L'augmentation de l'activités APX dans les plants de *Sesbania* traités au Zinc, suggèrent que le mécanisme de tolérance est développée dans cette plante (Israr et *al.*, 2011 ; Li et *al.*, 2013). En accord avec ces conclusions, on peut déduire le rôle important d'APX dans l'élimination des ROS dans les feuilles de blé exposé au Zinc, alors que cet enzyme peut ne pas être responsable de l'élimination des H₂O₂ dans les racines de blé.

Les changements environnementaux, y compris la salinité, influent sur la germination des graines en affectant leurs équilibres hormonaux.

Beaucoup de stratégies qui visent la lutte contre les effets néfastes du stress salin sur les plantes sont actuellement mise en pratique. Parmi ceux, l'application exogène des régulateurs de

croissance, les osmoprotecteurs, et des sels inorganiques est envisagée comme une approche économique à atténuer les effets néfastes de la salinité sur la croissance des plantes. Cette étude a été réalisée afin d'analyser le mécanisme par lequel le Zinc atténue la toxicité de NaCl dans le blé dur.

Le Zinc est un oligo-élément importants est impliqué dans un certain nombre de processus physiologique de la croissance des plantes et du métabolisme y compris la synthèse des protéines, l'activation des enzymes, des glucides, des lipides, des auxines et métabolisme acides nucléiques, l'expression génique et la régulation et la formation de pollen.

Dans notre travail on peut expliquer l'amélioration de la germination des graines par le fait que le Zinc intervient dans la production de l'Auxine, qui est une hormone végétale, joue un rôle clé dans la régulation du cycle cellulaire, de la croissance et le développement, la formation des tissus (Davies, 1995) et de pollen (Ni *et al.*, 2002), et le développement d'autres parties de la plante (He *et al.*, 2000a). La croissance et le développement des différentes parties de plantes, y compris l'embryon, les feuilles et les racines sont censées être contrôlés par le transport de l'auxine (Liu *et al.*, 1993; Xu, 1999; Rashotte *et al.*, 2000; Benjamins, 2008; Popko *et al.*, 2010).

Des études récentes ont également suggéré l'implication potentielle de l'auxine dans l'entretien de la dormance des graines. Par exemple, l'application exogène d'auxine améliorerait l'inhibition de la germination des graines par l'ABA chez *Arabidopsis* (Brady *et al.*, 2003; Lui *et al.*, 2007) et la germination des graines également retardée du blé (Morris *et al.*, 1988; Ramaih *et al.*, 2003). Cependant, si l'auxine est directement nécessaire pour la dormance des graines est difficile, et le mécanisme sous-jacent de la fonction auxine dans la dormance des graines reste inconnue. Au cours de nos études antérieures sur la croissance liés à l'auxine et de la défense (Zhang *et al.*, 2007; Lin *et al.*, 2012), nous avons constaté que *Arabidopsis* mutants auxine affichés germination soit accélérée ou inhibé des graines fraîchement récoltées, ce qui suggère un rôle actif de l'auxine dans la dormance des graines.

Le travail de Weisany *and al.* (2012) sur les plants de soya (*Glycine max* L.), montre que l'application de Zinc sur les plantules dans milieu qui contient NaCl, a souligné une augmentation de la longueur des feuilles, des racines.

Auparavant, il a souvent été émis l'hypothèse que l'amélioration du Zinc état nutritionnel des plantes en croissance dans des conditions de salinité était critique pour la protection des plantes contre la toxicité du sel. Ce rôle protecteur du Zinc a été attribué à son rôle dans le maintien de l'intégrité structurale de la membrane plasmique et contrôlant ainsi l'absorption de sodium et d'autres ions toxiques (Cakmak, 1988b).

La teneur en proline a diminué avec l'application de Zinc, par rapport aux traitements de la salinité, sans application préalable de Zinc. Ces résultats sont en accord avec ceux de Hendawy et

Khalid (2005), Cha-um et al, (2009), et Weisany et al, (2012). ils ont montré que, les concentrations des sucres totaux et les concentrations en proline ont diminué avec l'application de Zinc dans plantes *Salvia officinalis* L..

Les résultats de Tavallali and al, (2010), suggèrent que le Zinc peut empêcher les dommages oxydatifs dans les semis de pistaches (*Pistacia vera* L. 'Badami') dues au stress salin. La production de radicaux libres et augmentation de la peroxydation lipidique sous contrainte de sel peut entraîner une augmentation de la perméabilité et la perte de l'intégrité de la membrane (Dionisio-Sesc, 1998),

Le site principal d'attaque de la salinité dans une cellule végétale est habituellement la membrane cellulaire (logani, 1980). La Salinité induit sévère peroxydation lipidique via les ROS. Cela conduit à une cascade de réactions cycliques conduisant à la formation répétitive des alcanes à le stress abiotique, tels que la salinité, est connu pour déclencher l'oxydation du NADPH, conduisant à la production de radicaux superoxydes ($O_2 \cdot^-$) (Kawano et al., 2001). L'effet protecteur de Zn a été rapporté comme étant due à sa capacité à inhiber l'oxydation du NADPH et la production de radicaux libres de l'oxygène centrée (Cakmak, 1988a, 1988b). Le radical superoxyde ($O_2 \cdot^-$) produit est néfaste, qui produit indirectement un radical hydroxyle oxydant puissant ($OH \cdot$) par réaction avec H_2O_2 .

Cette réaction, appelée réaction de Haber-Weiss spécifique du site est catalysée par Fe (III), la réduction en Fe (II), suivie par la réduction de H_2O_2 par Fe (II). En tant que Fe (III) est fortement associée à des cibles polyanioniques, tels que l'ADN ou les membranes cellulaires, ces oxydants sont produits dans leur voisinage immédiat provoquant la répétition de cette réaction (Fridovich, 1986).

Chez les animaux, le double gradient de K^+ et Na^+ à travers le plasmalemme est mis en place et entretenu directement par une enzyme, l'ATPase Na^+ / K^+ . Les végétaux ont développés une stratégie différente, qui apparaît plus complexe: la membrane cellulaire est énergisée par une ATPase- H^+ , et ce sont les gradients transmembranaires de potentiel électrique et de pH résultant de l'activité de cette pompe qui entraînent le fonctionnement de divers systèmes de transport de K^+ et/ou Na^+ , canaux et transporteurs, symports ou antiports, dont l'activité intégrée aboutit à l'entretien des gradients transmembranaires de ces deux ions. Le monde végétal se distingue donc fondamentalement du monde animal dans le mode d'énergisation de la membrane cellulaire et le maintien des gradients de K^+ et Na^+ . Clairement, cette originalité mérite d'être explorée et comprise par le biologiste. Au-delà de cet aspect fondamental, l'analyse des transports membranaires de Na^+ et K^+ chez les plantes présente aussi l'intérêt de concerner directement un domaine important de la physiologie végétale et de l'agronomie, celui de l'étude des mécanismes d'adaptation aux sols salés et de réponse au stress salin. D'après les résultats de Jabnune, (2008),

La diminution de la dépolarisation lors d'ajouts de 15 à 300 μM de Na^+ s'interprète le plus logiquement comme une diminution des influx de sodium à haute affinité dans la racine de riz.

D'après les résultats de notre travail, l'ajout de Zinc à 0,12 mM dans le milieu salin augmente encore la dépolarisation par rapport au traitement avec le NaCl seul (50 Mm). On peut expliquer ce résultat par le fait que le Zinc augmente l'influx du sodium à l'intérieur de la racine.

Les stress Osmotique et ionique causés par stress salin peuvent entraîner une augmentation de taux des ROS (Zhu, 2003; Parida, 2005); par conséquent, les ROS ils sont piégé par enzymes antioxydants telles que la SOD, CAT et APX, qui jouent un rôle vital dans leurs élimination. La CAT et peroxydases comme APX décomposent H_2O_2 en H_2O et O_2 . Les résultats de l'étude montrent que les plantes traitées avec Zn avaient enregistré un taux très élevé de l'activité CAT et APX, ce qui indique qu'il y avait piégeant les radicaux libres du système. L'action combinée de SOD et CAT élimine efficacement le peroxyde d'hydrogène et de superoxyde, et indirectement protège les plantes contre les radicaux hydroxyles plus toxiques.

Dans les plantes traitées uniquement avec NaCl l'activité de toutes ces enzymes ont augmenté. La même tendance a également été observée chez les plantes traitées avec du Zn seulement, ce qui indique que l'augmentation de l'activité enzymatique en réponse au traitement du NaCl plus le Zinc était due à un stress oxydatif extrême causé par NaCl et la protection contre le stress salin par des taux élevés d'enzymes antioxydantes induites par le Zinc. Probablement, le Zinc est en mesure de faciliter la biosynthèse des enzymes antioxydantes (Cakmak, 2000).

D'après les résultats de Sofo et *al*, (2015), le taux des H_2O_2 diminue avec l'application de Zinc, par rapport aux traitements de la salinité, sans application préalable de Zinc. Le Zinc joue un rôle clé dans le contrôle de la production et de détoxification des radicaux libres d'oxygène qui peuvent endommager les lipides membranaires et des groupes sulfhydryles (Alloway, 2004). Le Zinc peut aider à limiter le taux de peroxydation des lipides, car il constitue un élément de protection et de stabilisation des membranes biologiques contre les espèces activées de l'oxygène (H_2O_2).

On peut déduire que le Zinc a efficacement protégés les plantules de blé dur du stress oxydatif induit par le sel en inhibant la peroxydation des lipides membranaires et de l'activité lipolytique de LOX, et en facilitant le bon fonctionnement des protéines membranaires. L'augmentation observée de l'activité des enzymes qui piègent les ERO prouve le rôle de Zinc en tant qu'agent antioxydant et son rôle dans la réduction de stress oxydatif. Par conséquent, on peut conclure que l'ajout de Zinc est bénéfique pour les systèmes vivants à faire face à la toxicité de NaCl.