

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTÈRE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ ABDELHAMID BEN BADIS MOSTAGANEM



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Filière : Sciences Biologiques
Spécialité : Phytoremédiation et réhabilitation des sites pollués
Option : Sciences du Sol et Environnement
Laboratoire de Biodiversité et Conservation des Eaux et des Sols

THÈSE
PRESENTÉE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME
DE DOCTORAT 3^{ème} CYCLE LMD
Par

M^{me} BOUKER Hadjira

**Effet du stress salin et des métaux lourds
(cuivre et zinc) sur la fève (*Vicia faba* L.)**

Soutenu publiquement le : 08/05/2024

Membre de jury

Pr. MEKHALDI Abdelkader	Président	Université de Mostaganem
Pr. REGUIEG YSSAAD Houcine AH	Directeur de thèse	Université de Mostaganem
Pr. DJIBAOUI Rachid	Examineur	Université de Mostaganem
Pr. BELKHOUDJA Moulay	Examineur	Université d'Oran

Année universitaire : 2023-2024

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

*Je tiens en premier lieu à remercier chaleureusement : Monsieur '' **REGUIEG YSSAAD Houcine Abdelhakim**'' Professeur à l'université de Mostaganem, mon directeur de thèse, pour sa grande disponibilité à n'importe quel moment, pour ses encouragements et surtout ses conseils précieux et judicieux, sa confiance et sa gentillesse, qui ont contribué à alimenter ma réflexion, et pour toutes les heures qu'il a consacrées pour diriger ce travail. Merci d'avoir reconnu mes efforts et mes difficultés.*

*Je tiens également à remercier les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ma thèse avec la neutralité d'un regard extérieur : **MEKHALDI Abdelkader** Professeur à l'université de Mostaganem qui m'a fait l'honneur de présider le jury, à Monsieur **BELKHOUDJA Moulay** Professeur à l'Université d'Oran et à Monsieur **DJIBAOUI Rachid** Professeur à l'université de Mostaganem, qui m'ont fait l'honneur d'examiner ma thèse.*

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à chers parents pour leur amour, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études. Ils étaient pour moi, une vraie source d'inspiration et ont été toujours à mes côtés jusqu'au bout dans les bons et les mauvais moments et sans eux et leur soutien, je ne serais pas là aujourd'hui.

À ma joie absolue, à mon coeur, à mon ange qui m'offre le bonheur dans ma vie « mon fils Mohamed Iyad ».

A tous ceux qui me sont chères.

Résumé

La faiblesse de la production agricole en Algérie constitue une des principales contraintes pour répondre aux besoins de la consommation, tandis que la pollution du sol par les métaux lourds et la salinisation devient un facteur de plus ou moins préoccupant pour l'agriculture. Pour cela, on s'intéresse dans notre travail de recherche à étudier le comportement morfo-physiologique et biochimique d'une plante modèle *Vicia faba* L. en réponse à des apports excessifs de Cu, Zn, et de NaCl dans le milieu de culture pour découvrir la capacité de tolérance de cette fabacée à ces polluants.

Dans ce cadre, Le stress métallique est appliqué durant deux semaines, après 45 jours de croissance de *Vicia faba* L. à différentes concentrations de Cu (0, 100, 300 et 500 ppm) et de Zn (0, 300, 500 et 700 ppm) en présence et absence de NaCl (0, 100 et 200 meq/l).

Les analyses morphologiques montrent une diminution de la hauteur des tiges et la longueur des racines, nombre des feuilles, et une réduction de la biomasse fraîche et sèche de différents organes des plantes de la fève par rapport au témoin.

Les analyses biochimiques et physiologiques montrent une diminution de la teneur en pigments chlorophylliens foliaires (chlorophylle **a**, **b** et **totale**), les teneurs en protéines et la teneur en eau, avec une accumulation importante des osmorégulateurs (proline et les sucres solubles), et des antioxydants non enzymatiques (polyphénols totaux et flavonoïdes) selon l'évolution du stress appliqués aux niveaux des feuilles et racines de la fève, qui se traduit par l'adaptation et la tolérance de la plante de *Vicia faba* L. aux stress salin et métalliques.

Les résultats obtenus montrent que l'espèce *Vicia faba* L. est modérément sensible au stress salin et métallique. Il s'avère que cette espèce est affecté par les stress abiotiques appliqués avec l'ordre : Zn < NaCl ≈ Cu < interaction métaux lourds-salinité.

Mots clés : Cu, Zn, NaCl, *Vicia faba* L., paramètres morfo-physiologiques, paramètres biochimiques.

Abstract

The weakness of agricultural production in Algeria constitutes one of the main constraints to meet consumption needs, while soil pollution by heavy metals and salinization becomes a more or less worrying factor for agriculture. For this, we are interested in our research work, to study the morpho-physiological and biochemical behavior of a model plant *Vicia faba* L. in response to excessive intakes of Cu, Zn, and NaCl in the culture medium to discover the tolerance capacity of this Fabacea to these pollutants.

In this context, metal stress is applied for two weeks, after 45 days of growth of *Vicia faba* L. at different concentrations of Cu (0, 100, 300 and 500 ppm) and Zn (0, 300, 500 and 700 ppm) in the presence and absence of NaCl (0, 100 and 200 meq/l).

The morphological analyzes show a reduction in the height of the stems and roots, number of leaves, and a reduction in the fresh and dry biomass of different organs of the bean plants compared to the controls.

Biochemical and physiological analyzes show a decrease in leaf chlorophyll pigment content (chlorophyll a, b and total), protein content and water content, with a significant accumulation of osmoregulators (proline and soluble sugars), and non-enzymatic antioxidants (total polyphenols and flavonoids) according to the evolution of stress applied to the leaves and roots of the bean, which results in the adaptation and tolerance of the *Vicia faba* L. plant to salt and metal stress.

The results obtained show that the species *Vicia faba* L. is moderately sensitive to salt and metal stress. It turns out that this species is affected by abiotic stresses applied with the order: Zn < NaCl ≈ Cu < heavy metals-salinity interaction.

Keywords: Cu, Zn, NaCl, *Vicia faba* L., morpho-physiological parameters, biochemical parameters.

يشكل ضعف الإنتاج الزراعي في الجزائر أحد القيود الرئيسية لتلبية احتياجات الاستهلاك، في حين أن تلوث التربة بالمعادن الثقيلة والملوحة أصبح عاملاً مقلقاً إلى حد ما للزراعة. لهذا ، نحن مهتمون بعملنا البحثي ، لدراسة السلوك المورفوفيزيولوجي والكيميائي الحيوي لنبات الفول النموذجي . استجابةً للإفراط في كميات النحاس والزنك وكلوريد الصوديوم المضافة في الوسط الزراعي لاكتشاف قدرة تحمل نبات الفول لهذه الملوثات.

في هذا السياق ، فقد تم تطبيق الإجهاد المعدني لمدة أسبوعين ، بعد 45 يوماً من نمو نبات الفول بتراكيز مختلفة من النحاس (0 ، 100 ، 300 و 500 جزء في المليون) والزنك (0 ، 300 ، 500 و 700 جزء في المليون) في وجود وغياب كلوريد الصوديوم (0 ، 100 و 200 مكافئ للتر).

اظهرت التحاليل المورفولوجية انخفاضاً في طول السيقان والجذور ، وعدد الأوراق ، وكذا انخفاض الوزن الرطب والجاف لمختلف أعضاء نبات الفول مقارنةً بالشاهد.

كما اظهرت التحاليل البيوكيميائية والفسولوجية انخفاضاً في محتوى صبغة كلوروفيل الأوراق (الكلوروفيل أ ، ب والكلبي) ، ومحتوى البروتين و كذا المحتوى المائي ، مع تراكم معتبر لمنظم التناضح (البرولين والسكريات القابلة للذوبان) ، ومضادات الأكسدة غير الأنزيمية (البوليفينول الكلي والفلافونويد) (وفقاً لتطور الإجهاد المطبق على الأوراق والجذور . والذي ينتج عنه تكيف وتحمل نبات الفول مع الملح والإجهاد المعدني.

أوضحت النتائج أن نبات الفول حساس بدرجة متوسطة للملح والإجهاد المعدني. بحيث اتضح أن هذا الصنف يتأثر بانواع الاجهاد اللاحيوي المطبق بالترتيب: زنك > نحاس ≈ كلوريد الصوديوم > تفاعل المعادن الثقيلة والملوحة.

الكلمات المفتاحية: النحاس، الزنك، كلوريد الصوديوم، الفول ، الخصائص المورفوفسيولوجية ، الخصائص البيوكيميائية.

Liste des abréviations

- ❖ **AFNOR** : L'Association Française de Normalisation.
- ❖ **As**: arsenic
- ❖ **Al** : Aluminium
- ❖ **ATP** : adénosine triphosphate
- ❖ **CaCO₃** : Carbonate de calcium
- ❖ **Ca⁺⁺** : Calcium
- ❖ **Cd**: cadmium
- ❖ **CE** : Conductivité électrique
- ❖ **CEC** : Capacité d'échange cationique
- ❖ **Chl**: chlorophylle
- ❖ **Cm** : centimètre
- ❖ **Co**: cobalt
- ❖ **Cr**: chrome
- ❖ **Cu** : cuivre
- ❖ **DO** : Densité optique
- ❖ **DPPH** : 2,2-diphényl-2-picryl-hydrazyle
- ❖ **EROs** : Espèces réactives de l'oxygène
- ❖ **ETM**: élément trace métallique
- ❖ **FAO** : Food and Agriculture Organization.
- ❖ **F**: Test de Fisher
- ❖ **Fe**: fer
- ❖ **G** : gramme
- ❖ **Hcl** : acide chlorhydrique
- ❖ **Hg**: mercure
- ❖ **K⁺** : potassium
- ❖ **Kg** : kilo gramme
- ❖ **Log** : Logarithme
- ❖ **M** : Mole
- ❖ **meq** : Milliéquivalent
- ❖ **MF**: matière fraîche
- ❖ **Mn**: manganese
- ❖ **Mo** : molybdène

- ❖ **MS** : matière sèche
- ❖ **Ni**: nickel
- ❖ **Na⁺** : Sodium
- ❖ **OMS** : Organisation Mondiale de la Santé.
- ❖ **P**: probabilité
- ❖ **Pb**: plomb
- ❖ **PC** : phytochélatines
- ❖ **PF**: proline foliaire
- ❖ **PFA** : poids frais aérien
- ❖ **PFR** : poids frais racinaire
- ❖ **pH** : potentiel hydrogène
- ❖ **ppm** : partie par million
- ❖ **PR** : proline racinaire
- ❖ **PSA** : poids sec aérien
- ❖ **PSR** : poids sec racinaire
- ❖ **RWC_f**: contenu relatif en eau foliaire
- ❖ **S** : Significatif
- ❖ **SOD** : Superoxyde dismutase
- ❖ **UNEP** : United Nations Environment Programme.
- ❖ **UV** : Ultra-violet
- ❖ **V/V** : Volume par volume
- ❖ **Zn** : zinc
- ❖ **FAO** : Food and Agriculture Organization
- ❖  : Diminution
- ❖  : Augmentation

Liste des figures

Figure 01 : Origine et contamination de la pollution métallique.....17

Figure 02 : Phytodisponibilité des ETM₅ dans les sols.....21

Figure 03 : Coupe transversale d'une racine montrant le transport des éléments traces par voies symplasmiques et apoplasmiques.....23

Figure 04 : Différentes formes de cuivre dans le sol en fonction des échanges entre les compartiments du sol (MOD = matières organiques dissoutes, H=humidité).....25

Figure 05 : Les différentes parties de la fève *Vicia faba* L.....38

Figure 06 : Graines de *Vicia faba* L.....45

Figure 07 : Préparation du substrat de culture.....47

Figure 08 : Préparation des pots.....48

Figure 09 : Serre expérimentale.....48

Figure 10 : Plantules de *Vicia faba* L. cultivées dans des alvéoles.....49

Figure 11 : Dispositif expérimental après le repiquage.....49

Figure 12 : Dispositif expérimental de l'essai conduit sous serre.....52

Figure 13 : Dispositif expérimental des plantes de *Vicia faba* L. après 75 jours du semis...53

Figure 14 : Prélèvement et préparation du matériel végétal.....54

Figure 15 : Organigramme montrant le protocole expérimental adopté pour l'impact de salinité et des métaux lourds (cuivre, zinc) sur *Vicia faba* L.....58

Figure 16 : Effet de NaCl sur le nombre des feuilles chez *Vicia faba* L.....60

Figure 17 : Effet de Cuivre sur le nombre des feuilles chez *Vicia faba* L.....61

Figure 18 : Effet de Zinc sur le nombre des feuilles chez *Vicia faba* L.....62

Figure 19 : Nombre des feuilles de *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl- Cuivre.....63

Figure 20 : Nombre des feuilles de *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl-Zinc.....64

Figure 21 : Effet de NaCl sur la longueur des tiges et racines(Cm) de *Vicia faba* L.....65

Figure 22 : Effet de cuivre sur la longueur des tiges et racines (Cm) de *Vicia faba* L.....66

Figure 23 : Effet de Zinc sur la longueur des tiges et racines (Cm) de *Vicia faba* L.....67

Figure 24 : longueur des tiges et racines (cm) de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre.....68

Figure 25 : longueur des tiges et racines (cm) de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc.....69

Figure 26 : Teneur relative en eau (%) des feuilles de *Vicia faba* L. stressée au NaCl.....70

Figure 27 : Teneur relative en eau (%) des feuilles de *Vicia faba* L. stressée au Cuivre.....71

Figure 28 : Teneur relative en eau (%) des feuilles de *Vicia faba* L. stressée au Zinc.....72

Figure 29 : Teneur relative en eau (%) des feuilles de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre.....73

Figure 30 : Teneur relative en eau (%) des feuilles de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc.....75

Figure 31 : Poids frais moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl.....76

Figure 32 : Poids frais moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre.....77

Figure 33 : Poids frais moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc.....78

Figure 34 : Poids frais moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre.....79

Figure 35 : Poids frais moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc.....80

Figure 36 : Poids sec moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl.....81

Figure 37 : Poids sec moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre.....82

Figure 38 : Poids sec moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc.....83

Figure 39 : Poids sec moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre.....85

Figure 40 : Poids moyen sec des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc.....86

Figure 41 : Teneur en chlorophylle a, b et totale (mg/g MF) de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl.....87

Figure 42 : Teneur en chlorophylle a, b et totale (mg/g MF) de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre.....89

Figure 43 : Teneur en chlorophylle a, b et totale (mg/g MF) de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc.....90

Figure 44 : Teneur en chlorophylle a, b et totale (mg/g MF) de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre.....91

Figure 45 : Teneur en chlorophylle a, b et totale (mg/g MF) de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc.....92

Figure 46 : Teneur en proline (mg/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl.....93

Figure 47 : Teneur en proline (mg/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre.....94

Figure 48 : Teneur en proline (mg/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc.....95

Figure 49 : Teneur en proline (mg/g Ms) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre.....96

Figure 50 : Teneur en proline (mg/g Ms) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc.....98

Figure 51 : Teneur en sucres solubles (mg/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl.....99

Figure 52 : Teneur en sucres solubles (mg/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre.....100

Figure 53 : Teneur en sucres solubles (mg/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc.....101

Figure 54 : Teneur en sucres solubles (mg/g Ms) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre.....102

Figure 55 : Teneur en sucres solubles (mg/g Ms) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc.....104

Figure 56 : Teneur en protéines totales (mg/g MF) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl.....105

Figure 57 : Teneur en protéines totales (mg/g MF) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre.....106

Figure 58 : Teneur en protéines totales (mg/g MF) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc.....107

Figure 59 : Teneur en protéines totales (mg/g MF) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre.....108

Figure 60 : Teneur en protéines totales (mg/g MF) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc.....109

Figure 61 : Teneur en polyphénols totaux (mg EAG/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl.....110

Figure 62 : Teneur en polyphénols totaux (mg EAG/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre.....111

Figure 63 : Teneur en polyphénols totaux (mg EAG/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc.....112

Figure 64 : Teneur en polyphénols totaux (mg EAG/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre.....113

Figure 65 : Teneur en polyphénols totaux (mg EAG/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc.....115

Figure 66 : Teneur en flavonoïdes (mg EQ/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl.....116

Figure 67 : Teneur en flavonoïdes (mg EQ/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre.....117

Figure 68 : Teneur en flavonoïdes (mg EQ/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc.....118

Figure 69 : Teneur en flavonoïdes (mg EQ/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre.....119

Figure 70 : Teneur en flavonoïdes (mg EQ/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc.....120

Figure 71 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les polyphénols totaux de *Vicia faba* L. sous l'effet du NaCl.....122

Figure 72 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les flavonoïdes de *Vicia faba* L. sous l'effet du NaCl.....123

Figure 73 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les polyphénols totaux de *Vicia faba* L. sous l'effet du Cuivre.....125

Figure 74 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les flavonoïdes de *Vicia faba* L. sous l'effet du Cuivre.....126

Figure 75 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les polyphénols totaux de *Vicia faba* L. sous l'effet du Zinc.....128

Figure 76 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les flavonoïdes de *Vicia faba* L. sous l'effet du Zinc.....129

Figure 77 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les polyphénols totaux de *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl-Cu.....131

Figure 78 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les flavonoïdes de *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl-Cu.....132

Figure 79 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les polyphénols totaux de *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl-Zn.....133

Figure 80 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les flavonoïdes de *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl-Zn.....134

Liste des tableaux

Tableau 01 : Différents classes de la salinité.....8

Tableau 02 : Classification de quelques métaux lourds selon leur densité et leur toxicité... 16

Tableau 03 : Concentrations moyennes de quelques ETMs dans les sols et les plantes en mg/kg. Étendue des moyennes observées dans la bibliographie.....16

Tableau 04 : Sources industrielles et agricoles des métaux présents dans l'environnement.....18

Tableau 05 : Caractéristiques physico-chimiques du substrat de culture.....46

Tableau 06 : Composition de la solution nutritive de Hoagland (1938).....50

Tableau 07 : Effet de NaCl sur le nombre des feuilles chez *Vicia faba* L. \pm l'écart type.....60

Tableau 08 : Effet de Cuivre sur le nombre des feuilles chez *Vicia faba* L. \pm l'écart type...61

Tableau 09 : Effet de Zinc sur le nombre des feuilles chez *Vicia faba* L. \pm l'écart type.....62

Tableau 10 : Nombre des feuilles de *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl- Cuivre \pm l'écart type.....63

Tableau 11: Nombre des feuilles de *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl-Zinc \pm l'écart type.....64

Tableau 12: longueur des tiges et racines (Cm) de *Vicia faba*L sous l'effet de NaCl \pm l'écart type.....65

Tableau 13: longueur des tiges et racines (Cm) de *Vicia faba*L sous l'effet de Cuivre \pm l'écart type.....66

Tableau 14: longueur des tiges et racines (Cm) de *Vicia faba*L sous l'effet de Zinc \pm l'écart type.....67

Tableau 15: longueur des tiges et racines (cm) de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre \pm l'écart type.....68

Tableau 16: longueur des tiges et racines (cm) de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc \pm l'écart type.....70

Tableau 17: Teneur relative en eau (%) des feuilles de *Vicia faba* L. stressée au NaCl \pm l'écart type.....71

Tableau 18: Teneur relative en eau (%) des feuilles de *Vicia faba* L. stressée au Cuivre \pm l'écart type.....72

Tableau 19: Teneur relative en eau des feuilles de *Vicia faba* L. stressée au Zinc \pm l'écart type.....73

Tableau 20: Teneur relative en eau des feuilles de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre \pm l'écart type.....74

Tableau 21: Teneur relative en eau des feuilles de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc \pm l'écart type.....75

Tableau 22: Poids frais moyen des parties aérienne et racinaire de <i>Vicia faba</i> L. sous l'effet de NaCl \pm l'écart type.....	76
Tableau 23: Poids frais moyen des parties aérienne et racinaire de <i>Vicia faba</i> L. sous l'effet de Cuivre \pm l'écart type.....	77
Tableau 24: Poids frais moyen des parties aérienne et racinaire de <i>Vicia faba</i> L. sous l'effet de Zinc \pm l'écart type.....	78
Tableau 25: Poids frais moyen des parties aérienne et racinaire de <i>Vicia faba</i> L. sous l'interaction NaCl-Cuivre \pm l'écart type.....	79
Tableau 26: Poids frais moyen des parties aérienne et racinaire de <i>Vicia faba</i> L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc \pm l'écart type.....	80
Tableau 27: Poids sec moyen des parties aérienne et racinaire de <i>Vicia faba</i> L. sous l'effet de NaCl \pm l'écart type.....	82
Tableau 28: Poids sec moyen des parties aérienne et racinaire de <i>Vicia faba</i> L. sous l'effet de Cuivre \pm l'écart type.....	83
Tableau 29: Poids sec moyen des parties aérienne et racinaire de <i>Vicia faba</i> L. sous l'effet de Zinc \pm l'écart type.....	84
Tableau 30: Poids sec moyen des parties aérienne et racinaire de <i>Vicia faba</i> L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre \pm l'écart type.....	85
Tableau 31: Poids moyen sec des parties aérienne et racinaire de <i>Vicia faba</i> L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc \pm l'écart type.....	86
Tableau 32: Teneur en chlorophylle a, b et totale (mg/g MF) de <i>Vicia faba</i> L. sous l'effet de NaCl \pm l'écart type.....	88
Tableau 33: Teneur en chlorophylle a, b et totale (mg/g MF) de <i>Vicia faba</i> L. sous l'effet de Cuivre \pm l'écart type.....	89
Tableau 34: Teneur en chlorophylle a, b et totale (mg/g MF) de <i>Vicia faba</i> L. sous l'effet de Zinc \pm l'écart type.....	90
Tableau 35: Teneur en chlorophylle a, b et totale (mg/g MF) de <i>Vicia faba</i> L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre \pm l'écart type.....	91
Tableau 36: Teneur en chlorophylle a, b et totale (mg/g MF) de <i>Vicia faba</i> L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc \pm l'écart type.....	92
Tableau 37: Teneur en proline (mg/g MS) des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L. sous l'effet de NaCl \pm l'écart type.....	93
Tableau 38: Teneur en proline (mg/g MS) des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L. sous l'effet de Cuivre \pm l'écart type.....	94
Tableau 39: Teneur en proline (mg/g MS) des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L. sous l'effet de Zinc \pm l'écart type.....	95
Tableau 40: Teneur en proline (mg/g Ms) des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre \pm l'écart type.....	97

Tableau 41: Teneur en proline (mg/g Ms) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc \pm l'écart type.....98

Tableau 42: Teneur en sucres solubles (mg/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl \pm l'écart type.....99

Tableau 43: Teneur en sucres solubles (mg/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre \pm l'écart type.....100

Tableau 44: Teneur en sucres solubles (mg/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc \pm l'écart type.....101

Tableau 45: Teneur en sucres solubles (mg/g Ms) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre \pm l'écart type.....103

Tableau 46: Teneur en sucres solubles (mg/g Ms) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc \pm l'écart type.....104

Tableau 47: Teneur en protéines totales (mg/g MF) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl \pm l'écart type.....105

Tableau 48: Teneur en protéines totales (mg/g MF) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre \pm l'écart type.....106

Tableau 49: Teneur en protéines totales (mg/g MF) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc \pm l'écart type.....107

Tableau 50: Teneur en protéines totales (mg/g MF) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre \pm l'écart type.....108

Tableau 51: Teneur en protéines totales (mg/g MF) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc \pm l'écart type.....109

Tableau 52: Teneur en polyphénols totaux (mg EAG/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl \pm l'écart type.....110

Tableau 53: Teneur en polyphénols totaux (mg EAG/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre \pm l'écart type.....111

Tableau 54: Teneur en polyphénols totaux (mg EAG/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc \pm l'écart type.....112

Tableau 55: Teneur en polyphénols totaux (mg EAG/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre.....114

Tableau 56: Teneur en polyphénols totaux (mg EAG/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc.....115

Tableau 57: Teneur en flavonoïdes (mg EQ/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl.....116

Tableau 58: Teneur en flavonoïdes (mg EQ/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre.....117

Tableau 59: Teneur en flavonoïdes (mg EQ/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc.....118

Tableau 60: Teneur en flavonoïdes (mg EQ/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre.....119

Tableau 61: Teneur en flavonoïdes (mg EQ/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc.....120

Tableau 62: Corrélation entre les osmorégulateurs et les antioxydants du *Vicia faba* L. sous l'effet du NaCl.....121

Tableau 63: Corrélation entre les osmorégulateurs et les antioxydants du *Vicia faba* L. sous l'effet du Cuivre.....124

Tableau 64: Corrélation entre les osmorégulateurs et les antioxydants du *Vicia faba* L. sous l'effet du Zinc.....127

Tableau 65: Corrélation entre les osmorégulateurs et les antioxydants du *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl-Cu.....130

Tableau 66: Corrélation entre les osmorégulateurs et les antioxydants du *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl-Zn.....132

Tableau 67: Tableau récapitulatif des principaux résultats de l'effet combiné de salinité et métaux lourds sur les paramètres biochimiques et morpho-physiologiques de *vicia faba* L.156

Annexe 01 : Références de la classification du sol (US Département of Agriculture)...209

Annexe 02 : Caractéristiques du terreau.....210

Annexe 3: Préparation des solutions stressantes.....210

Annexe 4: Capacité de rétention de l'eau.....210

Annexe 05 : Courbes d'étalonnage du dosage des paramètres étudiés.....211

Annexe 06 : Analyses statistiques de l'effet de NaCl, Cu et Zn sur les paramètres morpho-physiologiques de *Vicia faba* L.....213

Annexe 07 : Analyses statistiques de l'effet de NaCl, Cu et Zn sur les paramètres Biochimiques de *Vicia faba* L.....214

Table des matières

Remerciement.....	I
Résumé.....	II
Abstract.....	III
المخلص.....	IV
Liste des abréviations.....	V
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux.....	XI
Liste des annexes.....	XV

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

PARTIE I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I. STRESS SALIN

1. Généralités sur les différents types de stress.....	6
1.1. Définition du stress.....	6
1.2. Types du stress	
1.2.1. Stress biotique.....	6
1.2.2. Stress abiotique.....	6
a. Stress hydrique.....	6
b. Stress thermique.....	7
c. Stress salin.....	7
2. Salinité.....	7
2.1. Définition.....	7
2.2. Types de salinité.....	8
• Salinisation primaire.....	8
• Salinisation secondaire.....	8
2.3. Impact de la salinité sur les plantes.....	9
2.4. Effet de la salinité sur la germination.....	9
2.5. Effet de la salinité sur la croissance et le développement.....	9
2.6. Effet de la salinité sur l'eau dans la plante.....	10
2.7. L'effet de la salinité sur le comportement biochimique de la plante.....	10
2.8. Effet de la salinité sur l'absorption minérale.....	11
2.9. Effet de la salinité sur les enzymes antioxydants.....	11
3. Réponse et la stratégie adaptative de la plante aux stress salin.....	11
3.1. Exclusion.....	12

3.2.Inclusion.....12
3.3.Biosynthèse de solutés compatibles.....12

CHAPITRE II. METAUX LOURDS DANS LE SOL ET LE VEGETAL

1. Généralités sur les métaux lourds.....15
2. Origine de la contamination des sols par les ETMs.....16
2.1.Origine naturelle.....17
2.2.Origine anthropique.....17
3. Spéciation et mobilité des métaux lourds.....18
4. Transfert des ETM du sol vers la plante.....19
5. Mécanismes de transfert des ETM dans les plantes.....20
5.1.Absorption foliaire.....20
5.2.Absorption racinaire.....20
6. Translocation des ETM des racines vers les parties aériennes.....22
7. Les principaux métaux lourds.....23
7.1.Cuivre.....24
7.1.1. Cuivre dans les sols.....24
7.1.1.1.Sources de cuivre dans les sols.....24
7.1.1.2.Cuivre dans les différents compartiments du sol.....25
7.1.1.2.1. Cuivre dans la phase solide du sol.....26
7.1.1.2.2. Cuivre dans la solution du sol.....27
7.1.2. Cuivre dans la plante.....27
7.1.2.1.Cuivre, un oligo-élément pour les plantes.....28
7.1.2.2.Phytotoxicité cuprique.....29
7.1.2.3.Teneurs en cuivre dans la plante.....30
7.1.2.4.Absorption et distribution dans la plante.....31
7.2.Zinc.....32
7.2.1. Généralités.....32
7.2.2. Zinc dans le sol.....32
7.2.3. Zinc dans la plante.....33
7.2.3.1. Absorption du zinc.....33
7.2.3.2.Migration du zinc dans la plante.....34
7.2.3.3.Fonctions biochimiques du zinc.....34
7.2.3.4.Déficience en Zn et sa correction.....34

7.2.3.5.L'excès de zinc.....35

CHAPITRE III .LA FEVE (*Vicia faba* L.)

1. Classification.....37

2. Aspects et particularités.....37

3. Variétés de *Vicia faba* L. cultivées en Algérie.....39

 3.1.Séville.....39

 3.2.Aguadulce.....39

 3.3.Muchaniel.....39

 3.4.Sidi Moussa.....39

 3.5.Féverole.....39

4. Production de la fève en Algérie.....40

5. Exigences de la fève40

6. Cycle biologique de la fève.....40

7. Importance agronomique.....41

8. Intérêt écotoxicologie.....41

PARTIE II. ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE IV. MATERIEL ET METHODES

1. Objectif de l'essai.....45

2. Matériel et Méthode d'étude.....45

 2.1.Matériel végétal.....45

 2.2.Méthodes d'étude.....46

 2.2.1. Préparation du substrat de culture.....46

 2.2.2. Préparation des pots.....47

 2.3.Culture de *Vicia faba* L.....48

 2.3.1. Localisation de l'essai.....48

 2.3.2. Germination.....48

 2.3.3. Repiquage de graines germées.....49

 2.3.4. L'arrosage.....50

 2.4.Dispositif expérimental.....50

 2.5.Application de stress.....53

2.6.Échantillonnage du végétal.....	53
2.7. Paramètres étudiés.....	54
2.7.1. Paramètres morphologiques.....	54
2.7.1.1.Le nombre de feuilles et la croissance en longueur	54
2.7.1.2.Poids frais des parties aérienne et racinaire de la plante.....	54
2.7.1.3.Teneur en eau relative(RWC)	54
2.7.2. Paramètres biochimiques.....	55
2.7.2.1.Dosage des pigments chlorophylliens (mg.g ⁻¹ MF).....	55
2.7.2.2.Dosage du proline (mg.g ⁻¹ MS)	55
2.7.2.3.Dosage du sucre soluble (mg.g ⁻¹ MS)	56
2.7.2.4.Taux de protéine totale (mg.g ⁻¹ MF).....	56
2.7.2.5.Extraction des composés phénoliques	56
2.7.2.5.1. Dosage des phénols totaux	57
2.7.2.5.2. Dosage des flavonoïdes.....	57
3. Analyse statistique.....	57

CHAPITRE V : RESULTATS

1. Paramètres morpho-physiologiques.....	60
1.1.Nombre des feuilles	60
1.1.1. Effet de NaCl sur le nombre des feuilles chez <i>Vicia faba</i> L.....	60
1.1.2. Effet de cuivre sur le nombre des feuilles chez <i>Vicia faba</i> L.....	60
1.1.3. Effet de Zinc sur le nombre des feuilles chez <i>Vicia faba</i> L.....	61
1.1.4. Effet combiné (salin et métallique) sur le nombre des feuilles chez <i>Vicia faba</i> L.	
a) Effet combiné NaCl+CuSO ₄	62
b) Effet combiné NaCl+ZnSO ₄	63
1.2. Croissance en longueur des tiges et racines de la plante.....	64
1.2.1. Effet de NaCl sur la longueur des tiges et racines chez <i>Vicia faba</i> L.....	64
1.2.2. Effet de cuivre sur la longueur des tiges et racines chez <i>Vicia faba</i> L.....	65
1.2.3. Effet de Zinc sur la longueur des tiges et racines chez <i>Vicia faba</i> L.....	66
1.2.4. Effet combiné (salin et métallique) sur la longueur des tiges et racines chez <i>Vicia faba</i> L.	

a) Effet combiné NaCl+CuSO ₄	67
b) Effet combiné NaCl+ZnSO ₄	69
1.3. Teneur relative en eau des feuilles de <i>Vicia faba</i> L.....	70
1.3.1. Effet de NaCl sur la teneur relative en eau.....	70
1.3.2. Effet de Cuivre sur la teneur relative en eau.....	71
1.3.3. Effet de Zinc sur la teneur relative en eau.....	72
1.3.4. Effet combiné (salin et métallique) sur la teneur relative en eau (RWC%) chez <i>Vicia faba</i> L.	
a) Effet combiné NaCl+CuSO ₄	73
b) Effet combiné NaCl+ZnSO ₄	74
1.4. Poids frais de <i>Vicia faba</i> L.....	75
1.4.1. Effet de NaCl sur le poids frais.....	75
1.4.2. Effet de Cuivre sur le poids frais.....	76
1.4.3. Effet de Zinc sur le poids frais.....	77
1.4.4. Effet combiné (salin et métallique) sur le poids frais chez <i>Vicia faba</i> L.	
a) Effet combiné NaCl+CuSO ₄	78
b) Effet combiné NaCl+ZnSO ₄	80
1.5. Poids sec de <i>Vicia faba</i> L.....	81
1.5.1. Effet de NaCl sur le poids sec.....	81
1.5.2. Effet de Cuivre sur le poids sec.....	82
1.5.3. Effet de Zinc sur le poids sec.....	83
1.5.4. Effet combiné (NaCl +CuSO ₄) sur le poids sec chez <i>Vicia faba</i> L.	
a) Effet combiné NaCl+CuSO ₄	84
b) Effet combiné NaCl+ZnSO ₄	85
2. Paramètres biochimiques.....	86
2.1.Teneur en chlorophylle.....	86
2.1.1. Effet de NaCl sur la teneur en chlorophylle a, b et totale des feuilles de <i>Vicia faba</i> L.....	86

2.1.2. Effet de Cuivre sur la teneur en chlorophylle a, b et totale des feuilles de <i>Vicia faba</i> L.....	88
2.1.3. Effet de Zinc sur la teneur en chlorophylle a, b et totale des feuilles de <i>Vicia faba</i> L.....	89
2.1.4. Effet combiné (salin et métallique) sur la teneur en chlorophylle a, b et totale des feuilles de <i>Vicia faba</i> L.	
a) Effet combiné NaCl+CuSO ₄	90
b) Effet combiné NaCl+ZnSO ₄	91
2.2.Teneur en proline.....	93
2.2.1. Effet de NaCl sur la teneur en proline des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L...93	
2.2.2. Effet de Cuivre sur la teneur en proline des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L.....	94
2.2.3. Effet de Zinc sur la teneur en proline des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L...95	
2.2.4. Effet combiné (salin et métallique) sur la teneur en proline des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L.	
a) Effet combiné NaCl+CuSO ₄	96
b) Effet combiné NaCl+ZnSO ₄	97
2.3.Teneur en sucres solubles.....	98
2.3.1. Effet de NaCl sur la teneur en sucres solubles des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L.....	98
2.3.2. Effet de Cuivre sur la teneur en sucres solubles des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L.....	99
2.3.3. Effet de Zinc sur la teneur en sucres solubles des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L.....	101
2.3.4. Effet combiné (salin et métallique) sur la teneur en sucres solubles des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L.	
a) Effet combiné NaCl+CuSO ₄	102
b) Effet combiné NaCl+ZnSO ₄	103
2.4.Teneur en protéines totales.....	104
2.4.1. Effet de NaCl sur la teneur en protéines des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L...104	
2.4.2. Effet de Cuivre sur la teneur en protéines des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L..105	
2.4.3. Effet de Zinc sur la teneur en protéines des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L....106	
2.4.4. Effet combiné (salin et métallique) sur la teneur en protéines totales des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L.	

a) Effet combiné NaCl+CuSO ₄	107
b) Effet combiné NaCl+ZnSO ₄	109
2.5.Teneur en polyphénols totaux.....	110
2.5.1. Effet de NaCl sur la teneur en polyphénols totaux des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L.....	110
2.5.2. Effet de Cuivre sur la teneur en polyphénols totaux des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L.....	111
2.5.3. Effet de Zinc sur la teneur en polyphénols totaux des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L.....	112
2.5.4. Effet combiné (salin et métallique) sur la teneur en polyphénols totaux des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L.	
a) Effet combiné NaCl+CuSO ₄	113
b) Effet combiné NaCl+ZnSO ₄	114
2.6.Teneur en flavonoïdes.....	115
2.6.1. Effet de NaCl sur la teneur en flavonoïdes des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L.....	115
2.6.2. Effet de Cuivre sur la teneur en flavonoïdes des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L.....	116
2.6.3. Effet de Zinc sur la teneur en flavonoïdes des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L.....	117
2.6.4. Effet combiné (salin et métallique) sur la teneur en flavonoïdes des feuilles et racines de <i>Vicia faba</i> L.	
a) Effet combiné NaCl+CuSO ₄	118
b) Effet combiné NaCl+ZnSO ₄	120
2.7.Relation entre les osmorégulateurs et les antioxydants.....	121
2.7.1. Sous l'effet de NaCl.....	121
2.7.2. Sous l'effet de Cuivre.....	123
2.7.3. Sous l'effet de Zinc.....	126
2.7.4. Sous l'interaction NaCl-Cu.....	129
2.7.5. Sous l'interaction NaCl-Zn.....	132

CHAPITRE VI. DISCUSSION

I. Effet combiné de stress salin(NaCl) et métallique (Cu, Zn) sur la fève (<i>Vicia faba.L.</i>).....	136
VI.1.Effet de NaCl, Cu et Zn sur les paramètres morpho-physiologiques.....	136
VI.1.1. Croissance en longueur des tiges et racines de la plante.....	136
VI.1.2. Nombre des feuilles.....	138
VI.1.3. Teneur relative en eau.....	138
VI.1.4. Poids frais et sec des parties aérienne et racinaire de la plante.....	139
VI.2. Effet de NaCl, Cu et Zn sur les paramètres biochimiques.....	141
VI.2.1. Chlorophylles.....	141
VI.2.2. Proline.....	143
VI.2.3. Sucres solubles.....	145
VI.2.4. Protéines.....	147
VI.2.5. Les antioxydants.....	149
VI.2.6. Relation entre osmorégulateurs et antioxydants.....	152
Conclusion générale	154
Perspectives.....	155
Références bibliographiques	159
Annexe	209

Introduction

Générale

Introduction générale

La région de Mostaganem est une zone à forte production agricole et horticole, c'est l'une des principales zones agricoles en Algérie. L'urbanisation continue entraîne une pollution accrue des sols et des nappes phréatiques en métaux lourds. Les déchets des petites et grandes entreprises sont des sources possibles de pollution des sols, ces usines déversent leurs effluents dans les bras d'Oued Chlef, qui sont utilisés pour l'irrigation et s'écoulent dans la région de Mostaganem.

Le développement d'une agriculture plus intensive, même si elle a permis d'accroître les productions vivrières, a contribué à la pollution des sols notamment suite à l'usage intensif d'engrais de synthèse et de produits phytosanitaires pour lutter contre les mauvaises herbes et les parasites. Ces produits contiennent des éléments qui ne sont pas tous dégradables. Ils peuvent donc rester dans le sol ou être entraînés par la pluie vers les nappes phréatiques ou les rivières ou être transférés vers les plantes, les animaux et l'homme. La baisse de la qualité des sols peut donc induire une baisse des rendements des récoltes et de leur qualité nutritive. Selon **Perronnet (2017)**, les polluants rencontrés sont très variés, d'origine organique (hydrocarbures, solvants...), minérale ou métallique (plomb, mercure...). Il est bien connu que les activités anthropiques génèrent un grand nombre de substances présentant des effets nocifs sur l'homme et l'environnement. Particulièrement en milieu urbain, le regroupement de ces activités a conduit à une dégradation progressive de la qualité de l'air, des eaux et des sols.

Les polluants des sols proviennent principalement de trois ensembles d'activités : industrielles (production d'énergie, métallurgie, industries chimiques...), urbaines (transports, gestion et traitement des déchets), et agricoles (utilisation de produits phytosanitaires) (**Barriuso et al., 1996**).

Assurément, les métaux lourds font partie des principaux polluants inorganiques du sol. Il se trouve que ces éléments métalliques sont, sous différentes formes, toujours présents au sein de l'environnement. A l'état de traces, ils sont nécessaires voire indispensables aux êtres vivants. En revanche, ils présentent une toxicité plus ou moins forte à concentration élevée (**Giroux, 2008**). Parmi les différents métaux lourds présents dans les sols, le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cobalt (Co), le nickel (Ni), sont largement observés à l'échelle globale en raison de leurs nombreuses utilisations et de leur haute persistance écotoxique à concentration plus ou moins élevée selon la nature, la biodisponibilité, et la spéciation chimique de l'élément (**EEA, 2007**).

La contamination des sols par les métaux peut avoir deux conséquences majeures. D'une part, elle peut favoriser la dispersion des métaux dans l'environnement vers les eaux de surface par érosion, vers les eaux souterraines et les nappes par lixiviation-lessivage et, enfin, par transferts dans la chaîne alimentaire par l'intermédiaire des animaux (vers de terre, escargots...) et plus encore des végétaux. D'autre part, la contamination des sols par les métaux peut affecter les différentes fonctions du sol, i.e. celles contribuant aux services écosystémiques, et en particulier sa fonction de production en zones agricoles (**Adriano, 2004**).

Dans le domaine agricole, la plupart des métaux lourds accumulés dans le sol sont absorbés par les plantes cultivées. Car, ces plantes ont besoin pour leur croissance et leur développement certains ions métalliques comme par exemple le cuivre, le zinc, le manganèse, le fer ou le cobalt qui entrent dans la composition de certaines enzymes ou servent de co-facteurs (**Yang et al., 2005**). Ces éléments, nécessaires en faible quantité, s'avèrent cependant toxiques voire létaux lorsqu'ils sont présents en forte concentration.

A ce contaminant, s'ajoute le facteur salinité, une contrainte écologique pour les sols dans le monde entier, particulièrement le bassin méditerranéen. A l'heure actuelle, environ 25 % de toutes les terres sont salines. C'est dans les régions arides et semi-arides que le degré de salinité est le plus élevé (**Valentina et al., 2010**). Ce phénomène est considéré comme un processus majeur de la dégradation des terres. Actuellement dans le monde, on trouve sur 1,5 milliard d'hectares de terre cultivée, environ 77 millions d'hectares (5%) sont affectés par la teneur excessive en sel (**Sheng et al., 2008**). l'excès de sel dans le sol affecte la germination, la croissance des plantules et leur vigueur, la phase végétative, la floraison et la fructification à des degrés variables conduisant à terme à des baisses de rendement et de qualité des productions (**Lachhab et al., 2013**). Les plantes dites halophytes, sont capables de se développer normalement dans les milieux salins que les plantes sensibles au sel (glycophytes) (**Ghnaya et al., 2007**). En effet, cette contrainte est considérée comme l'un des principaux facteurs limitant la productivité et du développement agricoles.

En Algérie, la fève reste la plus importante culture vivrière, couvrant une surface de 58000 hectares avec un rendement total de 254000 tonnes (**Laamari et al., 2008**). Sa culture occupe la première place parmi les légumineuses en Algérie en raison de sa valeur nutritionnelle élevée et de ses divers usages. ; en plus, elle présente a un rôle important dans l'économie nationale (**Aouar-Sadli et al., 2008**). Outre son importance agronomique, la fève est également utilisé comme modèle biologique important pour les études éco-toxicologiques.

Introduction Générale

Des travaux ont été menés sur le comportement des espèces végétales à la salinité, en présence seulement du chlorure de sodium. Alors, que très peu d'études se sont intéressées au comportement de la fève stressée aux chlorures de sodium et aux métaux lourds simultanément.

Cette investigation s'enregistre dans la perspective d'étudier la réaction morpho-physiologique et biochimique d'une glycophytes *Vicia faba* L. cultivée sous l'effet conjugué de deux stress salin (NaCl) et métallique (cas de cuivre et zinc).

Ce travail est scindé en deux parties : bibliographique synthétisant les principales informations relatives au travail sollicité, pratique consacrée aux matériel et méthodes, résultats obtenus et leurs discussions, conclusion générale et les perspectives.

ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I

STRESS SALIN

1. Généralités sur les différents types de stress

1.1. Définition du stress

Le stress est l'ensemble des perturbations physiologiques provoqués dans l'organisme par des agents biotiques (parasite, pathogène) ou abiotiques (salinité, sécheresse, température, pollution métallique ...etc.) (**Maarouf et Raynaud, 2007**). Naturellement, les plantes doivent donc s'adapter pour faire face à des agressions biotiques et abiotiques (**Ishida et al., 2008**).

1.2. Types du stress

Les organismes sont généralement soumis à deux types de stress :

1.2.1. Stress biotique

Imposé par d'autres organismes (insectes, herbivores...), ils sont nombreux et ils ont pour origine les virus, les organismes phytophages et les pathogènes. Afin d'y faire face, la plante met en place un système de défense qui fait intervenir une chaîne de réactions. Les protéines végétales défensives produites font office de rempart contre les agents nuisibles (**Shilpi et Narendra, 2005**).

1.2.2. Stress abiotique

Il est dû principalement à des facteurs environnementaux comme la sécheresse, les températures extrêmes, excès d'eau (asphyxie racinaire), la salinité. On peut citer quelques types de stress abiotiques qui peuvent affecter les végétaux :

a) Stress hydrique

Il est provoqué par un déficit en eau constituant une menace permanente pour la survie des plantes, néanmoins, beaucoup d'entre elles produisent des modifications morphologiques et physiologiques qui leur permettent de survivre dans les régions de faible pluviosité et dont la teneur en eau des sols est peu élevée (**Hopkins, 2003**).

L'eau joue un rôle dominant sur les phénomènes de croissance et de développement. Un stress hydrique, peut limiter ainsi la croissance des végétaux, en modifiant le bilan entre la disponibilité et les besoins (**Bezzala, 2005**). Il induit, chez les plantes stressées, une diminution du contenu relatif en eau et une réduction significative de la production de la

biomasse totale (**Albouchiet al, 2000**) concomitante à une réduction de la croissance en diamètre et en hauteur des tiges (**Thomas et Gausling, 2000**).

En situation de déficit hydrique, la plante ferme ses stomates pour réduire ses pertes en eau (**Tardieu et Dreyer, 1997**). Cette fermeture va entraîner des modifications physiologiques, et morphologiques. L'entrée du CO₂ est également verrouillée lors de cette fermeture, entraînant une perturbation de l'activité photosynthétique. La fermeture emprisonne une bonne part de l'énergie destinée à être dissipée par transpiration, ce qui a pour conséquence l'augmentation de la température foliaire. Le stress hydrique a ainsi un effet direct sur la température de la végétation (**Shilpi et Narendra, 2005**).

b) Stress thermique

Il est provoqué par la température, c'est l'un des facteurs le plus limitant en conditionnant la production et la croissance des plantes, qui correspond à une élévation de la température approximativement de 10°C au-dessus de la température normale de croissance.

Tout effet négatif ou néfaste du stress thermique sur les membranes conduit à la rupture de l'activité cellulaire ou à la mort (**Schoffl et al., 1986**).

c) Stress salin

Le chlorure de sodium (NaCl) à haute concentration constitue une toxicité pour la majorité des plantes, ceci est dû à un effet caustique direct des ions chlorures et sodium, surtout pour son très fort pouvoir osmotique (**Parida et Das, 2005**). La concentration en sel dans l'environnement d'une plante varie énormément, elle peut être insuffisante ou excessive, mais le stress salin s'applique surtout à un excès d'ions (**Hopkins, 2003**).

2. Salinité

2.1.Définition

La salinité est définie comme la présence d'une concentration excessive de sels solubles dans le sol ou dans l'eau d'irrigation (**Maatougui, 2001**). Ce phénomène s'établit lorsque les concentrations en Na⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ sous formes de chlorures, carbonates, ou sulfates sont présentes en concentrations anormalement élevées (**Asloum, 1990**). La salinisation des sols constitue l'un des facteurs abiotiques majeurs réduisant le rendement agricole et augmentant la dégradation des sols. Dans le monde, il y a plus de 800 millions d'hectares de terre infectée par la salinité. Ce chiffre représente plus de 6% de la superficie totale de la terre (**FAO,**

2008). Les sels sont présents dans le sol naturellement, mais à un certain seuil ils deviennent néfastes pour les terres agricoles, le tableau suivant (Tableau.01) classe la salinité du sol selon le degré de conductivité électrique ; qui indique la sévérité de la salinité du sol.

Tableau 01 : Différents classes de la salinité (Saiema Rasool *et al.*, 2013).

Classe de la salinité	Degré de CE (dS/m)
Non salin	0 - 2
Salinité faible	2 - 4
Salinité modérée	4 - 8
Salinité forte	8 - 16
Salinité sévère	16 - 32
Salinité extrême	>32

2.2.Types de salinité

Bien que l'altération des roches et les minéraux primaires soit la principale source de tous les sels, les sols salés sont rarement formés par accumulation de sels in situ. Plusieurs causes sont à l'origine de ce phénomène (Maillard, 2001). D'après Mermoud (2006), la salinisation d'un milieu, implique la présence d'une source de sels qui peut être naturelle, dénommée primaire, et une salinisation anthropique, généralement liée à l'irrigation, que l'on appellera secondaire.

- **Salinisation primaire** : D'après Mermoud (2006), près de 80% des terres salinisées ont une origine naturelle, on qualifie alors la salinisation de « primaire». Dans ce cas, celle-ci est due à la formation des sels pendant l'altération des roches ou à des apports naturels externes :
 - Dans les régions côtières, intrusion de l'eau salée ou submersion des terres basses.
 - Inondation périodique par de l'eau de mauvaise qualité.
 - Remontée d'une nappe phréatique salée proche de la zone racinaire.
- **Salinisation secondaire** : 20% des terres salinisées, soit près de 15 M ha sur le continent Africain, ont une origine « anthropique ». On parle alors de salinisation « secondaire », induite par l'activité humaine comme l'urbanisation et l'agriculture (Saiema Rasool *et al.*, 2013).

2.3. Impact de la salinité sur les plantes

Les effets de la salinité sur les plantes sont complexes et ses conséquences incluent la toxicité par les ions (**Pang et al., 2007**), le déficit hydrique (**Desclos et al., 2008**), la déficience et le déséquilibre nutritifs (**Chen et al., 2007**). La grande majorité des stress salins est provoquée par des sels de sodium, particulièrement le NaCl. De ce fait, les termes halophytes et glycophytes font essentiellement référence aux stress provoqués par un excès de Na⁺ (**Gregory, 2005**). La salinité provoque un retard dans le développement et d'une manière générale la hauteur, le diamètre des tiges des différentes espèces, ainsi que la grosseur des fruits, diminuent d'une façon importante avec l'augmentation de la salinité (**Khan et al., 1997**). D'une façon générale, la tolérance au sel n'est pas constante pour une même espèce ou variété. Elle peut changer en fonction de l'espèce, du génotype, de l'âge et de l'état physiologique de l'organe.

2.4. Effet de la salinité sur la germination

La salinité réduit significativement la précocité de la germination des graines, alors que le pourcentage de cette dernière s'avère moins influencé par le stress salin (**Drevon et Sifi, 2003**). Elle affecte tous les processus de germination suite à la baisse du potentiel hydrique autour des graines, ce qui rend l'eau inaccessible à cette dernière pour la réhydratation et la reprise de la vie active de l'embryon (**Rejili et al., 2006**). Les effets toxiques sont liés à une accumulation cellulaire de sels qui provoquent des perturbations des enzymes impliquées dans la physiologie des graines en germination, empêchent la levée de dormance des embryons et conduisent à une diminution de la capacité de germination (**Rejili et al., 2006**). A titre d'exemple ; le taux de germination du cotonnier chute de 70% en présence de 12 g/l de chlorure de sodium (NaCl) et la germination des tubercules de pomme de terre peut être retardée de 3 à 7 jours selon le degré de salinité du sol (**Levigneron et al., 1995**). La luzerne qui voit sa germination affectée négativement par la présence du sel et peut être inhibée complètement à des concentrations supérieures à 15 g/l de NaCl (**Chaibi, 1995**).

2.5. Effet de la salinité sur la croissance et le développement

La réponse immédiate du stress salin est la réduction de la vitesse de l'expansion de la surface foliaire ce qui conduit à l'arrêt de l'expansion si la concentration du sel augmente (**Wang et Nil, 2000**). Le stress salin résulte aussi une diminution de la biomasse sèche et fraîche des feuilles, tiges et racines (**Chartzoulakis et Klapaki, 2000**). Les sels solubles

peuvent empêcher les racines d'absorber l'eau et les éléments nutritifs et, ainsi, restreindre la croissance des plantes cultivées, d'où un rendement plus faible (Wiebe, 2001). La salinité accrue est accompagnée par une réduction significative dans la biomasse racinaire, la hauteur de la plante, le nombre de feuilles par plante, la longueur des racines et la surface racinaire chez la tomate (Pessaraki *et al.*, 1998). Le taux élevé de NaCl se manifeste par une faible croissance dans la biomasse des racines, tiges et feuilles et une augmentation dans le ratio partie racinaire/partie aérienne chez le coton (Meloni *et al.*, 2001).

2.6. Effet de la salinité sur l'eau dans la plante

Le stress salin induit des changements au niveau du statut hydrique de la plante (Hasegawa *et al.*, 2000 ; Fricke et Peters, 2002) et il réduit le contenu relatif en eau des feuilles (Albouchi *et al.*, 2003), aussi, il diminue la transpiration (Rengasamy, 2006), l'absorption hydrique par les racines, ce fait a été établi chez des plantes de résistance différentes (Snoussi *et al.*, 2004).

2.7. Effet de la salinité sur le comportement biochimique de la plante

La salinité du milieu induit une perturbation de la composition lipidique et protéique au niveau de la membrane cellulaire, affectant ainsi sa stabilité (Alem et Amri, 2005). L'excès de sel devient toxique à un certain degré et accélère la sénescence naturelle des feuilles, en réduisant la capacité photosynthétique causé par la fermeture des stomates qui limite l'entrée du CO₂ (Zhu, 2001; Munns, 2002).

Chez diverses espèces, plus ou moins résistantes, les sucres totaux augmentent suite à la résultante d'un blocage de la glycolyse ou du saccharose provenant d'une forte hydrolyse de l'amidon (Asloun, 1990). Selon Hadjadj (2009), l'accumulation des sucres solubles est importante dans les feuilles des plantes d'*Atriplex halimus* L. Et d'*Atriplex canescens* soumises à un stress salin. D'autre part, Alem et Amri (2005), signalent que la proline est l'acide aminé le plus caractérisé des plantes soumises au stress salin. L'importance de la proline comme indicateur aux agressions semble jouer un rôle dans le maintien des pressions sol-vacuole, mais aussi dans la protection des membranes et des systèmes enzymatiques. Ainsi qu'un régulateur du pH.

2.8.Effet de la salinité sur l'absorption minérale

L'absorption à haute concentration de NaCl engendre une compétition entre les éléments minéraux, spécialement le sodium Na^+ , ce qui conduit à une déficience minérale des autres éléments. Selon **Khan (2001)** le traitement accru de NaCl induit une augmentation dans le taux du Na^+ et Cl^- et une diminution dans le taux du Ca^{2+} , le K^+ et le Mg^{2+} chez de nombreuses plantes. La salinité fait augmenter le contenu en Na^+ , Ca^{2+} et en Cl^- chez *Vicia faba* L, par contre, le rapport K^+/Na^+ diminue (**Haouala et al, 2007**).

Les effets nutritionnels de la salinité incluent les deux actions primaires du sel sur les plantes : la toxicité directe due à l'accumulation excessive des ions Na^+ et Cl^- dans les tissus et un déséquilibre nutritionnel provoqué par l'excès de certains ions. L'accumulation des ions Na^+ dans la plante limite l'absorption des cations indispensables tels que K^+ et Ca^{2+} . Il y aurait une compétition entre le Na^+ et le Ca^{2+} pour les mêmes sites de fixation apoplasmique (**Hernandez et al., 2000**). L'accumulation des ions Na^+ affecte l'absorption de K^+ et ceci en fonction de la concentration du premier élément, cependant, la présence de Na^+ en faible concentration peut augmenter l'absorption de K^+ , tandis qu'une concentration élevée en Na^+ diminue (**Haouala et al, 2007**).

2.9.Effet de la salinité sur les enzymes antioxydants

Les effets inhibiteurs imposés par la salinité sur le processus de la germination peuvent être également expliqué par l'altération de l'activité enzymatique, indispensable à la réactivation cellulaire pendant cette phase. Ainsi la salinité inhibe l'activité de plusieurs enzymes (**Blum, 1988 ; Larcher, 1995**). La réponse aux stress chez un organisme fait intervenir un grand nombre d'enzymes, telles que le superoxyde dismutase, les peroxydases, la catalase et la glutathion réductase (**Vincent, 2006**). Les composés réduits de l'oxygène ont une chimie très étendue, sont à l'origine d'effets mutagènes et entraînent des altérations sur les protéines et les lipides. Pour faire face à ces inconvénients, les cellules vivantes se sont dotées de plusieurs armes efficaces pour éliminer les réactifs EAO. Ces mécanismes peuvent être divisés en deux catégories selon qu'ils impliquent des enzymes de façon directe ou indirecte (**Sofa et al, 2004**).

3. Réponse et la stratégie adaptative de la plante aux stress salin

La résistance d'une plante à la salinité s'exprime par sa capacité à survivre et à produire dans des conditions de stress salin (**Prado et al., 2000**). Les plantes développent plusieurs

stratégies pour limiter le stress salin, qui diffèrent selon la catégorie de la plante (**Berthomieu et al., 2003**). Chez les plantes sensibles au NaCl, le Na⁺ s'accumule dans les racines, puis exclu des feuilles, ces plantes sont dites « excluser ». A l'inverse, les plantes tolérantes au NaCl, sont dites « incluser », car, elles ont en général des feuilles plus chargées en Na⁺ que les racines lorsqu'elles sont cultivées en présence de sel (**Haouala et al., 2007**).

3.1. Exclusion

La plante empêche le sel et remonter dans la sève jusqu'aux feuilles. La présence de l'endoderme dans les racines ainsi que le transport sélectif permettent d'absorber les ions nutritifs utiles et de ré-excréter les ions Na⁺ (**Genoux et al., 1991**). Quelques halophytes peuvent empêcher l'absorption excessive de sel par exclusion du sel au niveau des racines et de la partie inférieure de la tige. Dans ce cadre, la sortie de Na⁺ des vaisseaux du xylème en échange d'une entrée de K⁺ venant des cellules parenchymateuses du xylème et du parenchyme avoisinant, joue un rôle important dans la tige et les racines (**Luttge et al., 2002**).

3.2. Inclusion

La plante capte le sel qui parvient aux feuilles au même titre que l'eau par le mouvement ascendant de la sève dans les vaisseaux, le sel est alors stocké dans les vacuoles grâce à des systèmes de pompes moléculaires et ainsi le sel est isolé des constituants cellulaires vitaux (**Berthomieu et al., 2003**). La résistance des plantes à la salinité est définie par **Shannon et Grieve (1999)** comme étant la capacité inhérente des plantes à résister aux effets des concentrations élevées en sels dans le profil racinaire où sur les feuilles sans subir des effets nuisibles significatifs. **Sacher et Staples (2001)** ont défini la tolérance à la salinité comme étant la capacité des plantes d'accroître et d'accomplir son cycle de vie sur un substrat qui contient des concentrations élevées en sels solubles. Dans cet habitat la plante doit répondre à deux exigences : l'adaptation osmotique et l'acquisition des éléments minéraux dont elle a besoin pour la croissance et le fonctionnement du métabolisme (**Gómez-Cadenas et al., 1998**).

3.3. Biosynthèse de solutés compatibles

Pour adapter l'équilibre ionique dans la vacuole, le cytoplasme accumule des composés de petite masse moléculaire nommés solutés compatibles parce qu'ils n'interfèrent pas avec les réactions normales biochimiques, en revanche ils remplacent l'eau dans les réactions chimiques (**Parida et Das, 2005**).

Les solutés compatibles, accumulées pendant l'ajustement osmotique, sont des composés très solubles qui ne portent aucune charge nette à pH physiologique, et sont non-toxiques à fortes concentrations intracellulaire et à plus hautes températures. Sous des conditions osmotiques défavorables, les solutés compatibles élèvent la pression osmotique dans le cytoplasme et stabilisent les protéines et les membranes (**Rasanen, 2002**).

Les mécanismes de l'osmoprotection des solutés compatibles sont supposés être en rapport avec l'absence d'effets perturbateurs d'interactions macromolécule-solvant. Les ions inorganiques, tels que l'ion Na^+ et l'ion Cl^- , réagissent directement avec les protéines, favorisant le dépliage menant à la dénaturation des protéines, alors que les solutés compatibles sont exclus des surfaces protéïques (**Rhodes et Hansons, 1993; Rasanen, 2002**).

Les plantes peuvent synthétiser trois types de solutés compatibles:

- Bétaïnes ou composés d'ammonium quaternaire (par exemple la glycine- bêtaïne) ;
- Polyols et sucres (par exemple tréhalose) ;
- Acides aminés (par exemple proline).

Les polyols sont classifiés comme acycliques (mannitol) et cycliques (pinitol). Les polyols agissent en deux manières qui sont difficile à séparer: ce sont l'ajustement osmotique et osmoprotection. Dans l'ajustement osmotique, ils agissent comme des osmolytes pour faciliter la rétention de l'eau dans le cytoplasme et permettant la séquestration du NaCl à la vacuole ou l'apoplaste (**Hasegawa et al., 2000**).

Les osmolytes, généralement de nature hydrophilique, sont des molécules peu chargées mais polaires et très solubles (**Sairam et Tyagi, 2004**), protègent la structure cellulaire en interagissant avec les membranes, complexes protéïques, ou enzymes. Ces composés ont des caractéristiques, des liaisons d'hydrogène qui leurs permettent de protéger des macromolécules, des effets néfastes de l'augmentation de la force ionique dans les milieux avoisinant (**Crowe et al., 1992**). Par une association étroite entre les protéines et les composants de la membrane, les polyols compensent la perte de l'eau pendant le stress (**Parida et Das, 2005**). Une autre fonction attribuée à ces osmolytes constitue la protection contre l'action des radicaux oxygénés suite au stress salin (**Blumwald et al., 2004**).

Chapitre II

METAUX LOURDS DANS LE SOL ET LE VEGETAL

1. Généralités sur les métaux lourds

Les éléments traces métalliques (ETM) définis comme des métaux lourds. On appelle métaux lourds tout élément métallique naturel dont la masse volumique dépasse 5g/cm³ de numéro atomique supérieur à 20 et formant des précipités insolubles avec les sulfures (**Wang et Chen, 2006**). C'est le cas, par exemple, du zinc, du cuivre, du plomb, du mercure, du chrome, du manganèse, du cobalt, de l'argent, du nickel et du cadmium (Tableau.2). Ils englobent l'ensemble des métaux (Pb, Zn, Cu etc.) et métalloïdes (As, B, Se) présentant un caractère toxique pour la santé et l'environnement (**Kabata-Pendias, 2011**).

Dans les conditions physiologiques, les métaux lourds sont classés comme éléments essentiels et non essentiels pour les organismes (**Asati et al., 2016**). Les métaux essentiels comme le zinc (Zn), le cuivre (Cu), le cobalt (Co), le manganèse (Mn) et le molybdène (Mo) jouent un rôle important dans les processus physiologiques des organismes vivants. Tandis que les métaux lourds ou les métalloïdes non essentiels comme l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le plomb (Pb) et le mercure (Hg) ne sont pas nécessaires aux organismes, mais ils affectent les processus physiologiques en perturbant les réactions enzymatiques en raison de leur réactivité avec les thiols ou autres groupes (**Tchounwou et al., 2012 ; Rahman et al., 2012**).

Ils sont une préoccupation majeure du fait de leur (éco) toxicité, leur persistance dans les sols, leur effet toxique sur les plantes cultivées et leur présence très fréquente dans les zones urbaines les plus peuplées (**Wu et al., 2015**). Ainsi, l'excès de polluants métalliques peut induire une dégradation de la qualité des sols en particulier dû à leurs effets écotoxiques sur les microorganismes (**Bérard et al., 2015**), ce qui peut avoir des conséquences négatives sur les services écosystémiques tels que la biodégradation de la matière organique ou la production végétale (**Austruy et al., 2016**). Au cours des dernières décennies, la quantité de métaux lourds d'origine anthropique rejetée dans les sols de notre planète a fortement augmenté ; les quantités suivantes ont été estimées par **Singh et al., (2011)** : 1.350.000 t de zinc, 939.000 t de cuivre ,783.000 tonnes de plomb et 22.000 t de cadmium.

Chapitre II : Métaux lourds dans le sol et le végétal

Tableau 2: Classification de quelques métaux lourds selon leur densité et leur toxicité (Bliefert et Perraud, 2001).

Métal	Plantes		Animaux		Densité(en g/cm ³)
Pt		T			21.4
Hg		T		T	13.59
Pb		T		T	11.34
Mo	E		E	T	10.2
Cu	E	T	E	T	8.92
Ni		T	E		8.90
Co			E		8.9
Cd		T		T	8.65
Fe	E		E		7.86
Sn			E		7.28
Cr			E		7.20
Mn	E	T	E		7.2
Zn	E	T	E		7.14
V	E		E		5.96

T : toxique, E : essentiel

2. Origine de la contamination des sols par les ETMs

Un sol est considéré comme contaminé par les ETMs lorsque la teneur en un élément donné est significativement supérieure à sa concentration naturelle dans le sol étudié. Les horizons supérieurs des sols étant généralement contaminés par des apports d'origine diffuse, le fond pédo-géochimique local est évalué à partir des horizons profonds (**King et al., 2008**).

Tableau 3 : Concentrations moyennes de quelques ETMs dans les sols et les plantes en mg/kg. Étendue des moyennes observées dans la bibliographie par Gardea-Torresdey et al. (2005).

ETM (mg/kg)	Sols non métallifères	Sols métallifères	Dans les plantes sur sols non métallifères
Cadmium	0,01 - 2	10 – 320	0,1 - 3
Chrome	5 - 1500	50 – 8450	0,2 - 5
Cuivre	2 - 250	52 – 50900	5 - 25
Mercure	0,01 – 0,5	100 – 400	0,1 – 9,5
Nickel	2 - 750	20 – 11250	1 - 10
Plomb	2 – 300	3850 - 49900	0,1 – 5
Zinc	1 - 900	110 - 70450	2 - 400

La composition d'un sol en ETMs peut aussi varier entre les différents horizons. Ainsi, un cycle biogéochimique se met en place entre les sols et les plantes. Ces dernières absorbent les ETMs via les racines et les redistribuent dans leurs différents organes. Ils retourneront ensuite dans les sols, soit directement (décomposition des racines), soit indirectement

Chapitre II : Métaux lourds dans le sol et le végétal

(enrichissement des horizons supérieurs par décomposition des parties aériennes), sous des formes plus mobiles et plus biodisponibles. L'exportation des récoltes rompt ce cycle puisqu'elle provoque le départ des ETMs contenus dans les feuilles, les tubercules et/ou les graines des végétaux et entrent ainsi dans la chaîne alimentaire humaine (Assad, 2017).

Leur présence dans les sols peut être naturelle ou anthropogénique (Figure. 1)

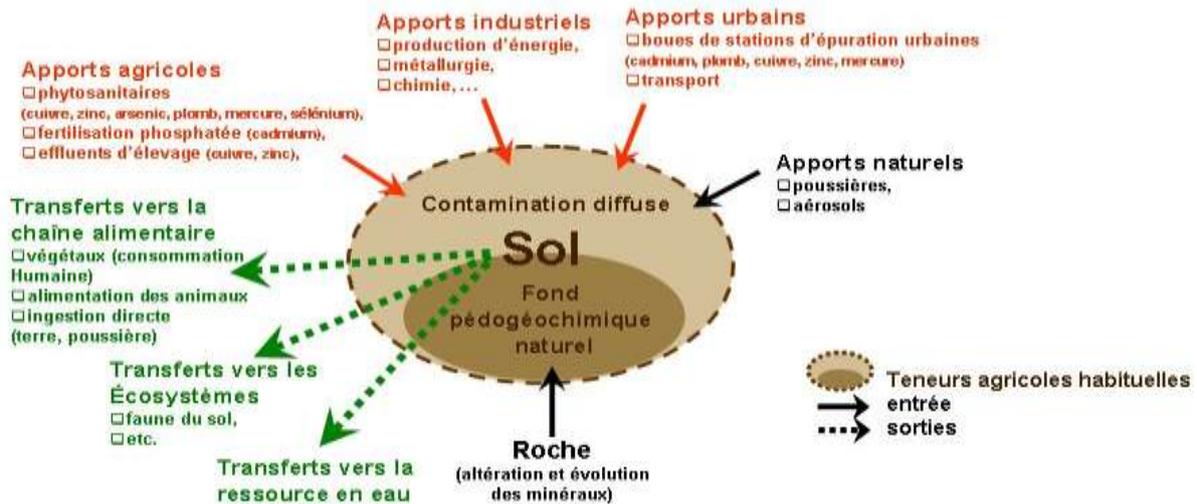


Figure 1. Origine et contamination de la pollution métallique (Demeure, 2016)

2.1. Origine naturelle

Les ETM sont naturellement présents dans les sols en faibles quantités. Ils sont en partie libérés lors de l'altération de la roche mère (roches magmatiques, métamorphiques ou sédimentaires) ,par l'altération des minéraux primaires et secondaires comme les argiles, oxydes et carbonates (Toth et al., 2016). Ils constituent le pool endogène appelé fond pédogéochimique : concentration naturelle d'une substance dans un horizon de sol, résultant de l'évolution géologique et pédologique, à l'exclusion de tout apport d'origine anthropique (Baize et Tercé, 2002).

2.2. Origine anthropique (Tableau.4)

Les concentrations mesurées dans les sols sont liées, pour l'essentiel, à des émissions d'origine anthropiques :

- **Les sources agricoles** : Elles correspondent aux impuretés présentes dans les produits phytosanitaires (comme le cuivre dans la bouillie bordelaise ou le plomb dans les pesticides), les lisiers (Cu, Zn, Cd) ou les engrais (Mn dans les scories potassiques, Cd

Chapitre II : Métaux lourds dans le sol et le végétal

dans les engrais phosphatés). La contamination provient d'apports directs gérés au niveau de la parcelle ou de son environnement proche par les eaux de ruissellement (Sekomo *et al.*, 2011).

- **Les sources urbaines** : Elles regroupent l'épandage des boues de station d'épuration ou des boues de curage (apport de Cr, Cu et Pb), l'incinération de déchets domestiques (Cd) ou le trafic routier (apport de Zn, de Cd lors de la combustion des carburants ou de Pb utilisé comme antidétonant) (Yang *et al.*, 2011).
- **Les sources industrielles** émettent dans l'environnement tous les éléments métalliques par les activités métallurgiques telles que le traitement des minerais, l'exploitation minière, le raffinage, l'élaboration d'alliages ou d'acier mais aussi lors de processus industriels plus élaborés comme le recyclage du plomb des batteries ou l'élaboration de peintures (Min *et al.*, 2013).

Tableau 4 : Sources industrielles et agricoles des métaux présents dans l'environnement (Brignon et Malherbe, 2005).

Utilisations	Métaux
Batteries et autres appareils électriques	Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Ni,
Pigments et peintures	Ti, Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Sn, Cr, Al, As, Cu, Fe
Alliages et soudures	Cd, As, Pb, Zn, Mn, Sn, Ni, Cu
Biocides (pesticides, herbicides)	As, Hg, Pb, Cu, Sn, Zn, Mn
Agents de catalyse	Ni, Hg, Pb, Cu, Sn
Verre	As, Sn, Mn
Engrais	Cd, Hg, Pb, Al, As, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn
Matières plastiques	Cd, Sn, Pb
Produits dentaires et cosmétiques	Sn, Hg
Textiles	Cr, Fe, Al
Raffineries	Ni, V, Pb, Fe, Mn, Zn
Carburants	Ni, Hg, Cu, Fe, Mn, Pb, Cd

3. Spéciation et mobilité des métaux lourds

❖ La spéciation

La spéciation est définie comme la distribution des espèces chimiques d'un élément au sein d'un système, solide ou liquide (Templeton *et al.*, 2000). Ces espèces sont différenciées selon leur composition isotopique, leur structure électronique, leur état d'oxydation, et/ou leur

structure moléculaire. Cependant, le terme de spéciation d'un élément dans un sol est souvent utilisé dans un sens plus large englobant la distribution ou les processus d'identification des différentes phases d'un élément dans le milieu solide ou liquide (**Ure et Davidson, 2007**). Pour décrire cela, l'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) a proposé d'utiliser le terme « fractionation » et de garder au terme « spéciation » son sens classique (**Templeton et al., 2000**).

❖ *La mobilité*

La forme chimique des ETMs affecte leur mobilité dans les sols et leur capacité de transfert dans les différents compartiments environnementaux. La mobilité correspond à l'aptitude d'un élément à passer d'un compartiment du sol où il est retenu avec une certaine énergie vers un autre compartiment où il est retenu avec une énergie moindre. Elle peut être étudiée au travers du changement de phase porteuse d'un élément (**Templeton et al., 2000**). A l'échelle d'un sol, la mobilité d'un élément peut être évaluée en étudiant sa distribution verticale ou latérale (**Viard et al., 2004**).

❖ *La biodisponibilité*

La notion de biodisponibilité des ETMs est définie par le passage d'un élément au travers d'une membrane biologique, végétale ou animale (**Lebourg et al., 1996**). Elle dépend d'une part, de la fraction de l'élément qui peut être mobilisée physiquement et chimiquement dans le sol et d'autre part, de la capacité d'une espèce donnée à l'absorber (**Michel et Ludwig, 2005**).

4. Transfert des ETM du sol vers la plante

Les plantes prélèvent les ETMs dans leur milieu de croissance pour les répartir ensuite entre les racines et le feuillage. Les plantes absorbent préférentiellement les ETMs de la solution du sol, sous forme ionique libre ou complexée (**Lopes et al., 2012**).

Plusieurs risques environnementaux sont liés à cette entrée d'ETMs dans les plantes : l'introduction des contaminants dans la chaîne alimentaire, la possibilité d'une perte de la couverture végétale par phytotoxicité ou la modification du cycle des ETMs à la surface du sol par les plantes tolérantes (**Bermudez et al., 2012**). Le transfert des éléments métalliques du sol vers les plantes dépend des paramètres physico-chimiques du sol, des concentrations en

métaux dans les sols (totales ou disponibles), de leur mobilité et de leurs interactions, ainsi que de l'espèce végétale considérée (**Lopes et al., 2012**).

5. Mécanismes de transfert des ETM dans les plantes

Les mécanismes de prélèvement et d'accumulation des ETMs dans les plantes peuvent intervenir à différents niveaux depuis l'absorption par les racines jusqu'à l'accumulation dans les feuilles. En effet, les ETMs peuvent rentrer dans la plante soit par la voie racinaire, soit par la voie aérienne.

5.1. Absorption foliaire

L'absorption foliaire peut représenter une voie importante dans la contamination de la plante (**Schreck et al., 2012**). C'est le cas dans les zones à forte contamination atmosphérique en milieu urbain ou industriel (**Pacheco et al., 2008**). Dans une zone industrielle, **Bi et al., (2009)** ont également montré que la voie atmosphérique était la voie majeure d'entrée de Pb dans les feuilles et les grains de maïs.

Les éléments essentiels ou non essentiels peuvent se déposer sur les surfaces des organes aériens de la plante, avec des retombés atmosphériques par voie humide ou sèche (**Callender et Rice, 2000**). Une partie solubilisée de ces ETMs va s'adsorber aux lipides épicuticulaires et pénétrer dans les feuilles sous forme d'ions après le passage au travers de la cuticule qui fonctionne comme un faible échangeur d'ions (**Uzu et al., 2010**). La perméabilité de la cuticule dépend de la taille du cation. Ainsi, la majeure partie de Pb reste fixée au niveau de la cuticule tandis que Cd, Zn et Cu pénètrent plus facilement dans la feuille (**Prasad et Hagemeyer, 1999**).

Les ETMs non solubilisés peuvent également pénétrer dans les feuilles via les stomates avec des particules de diamètre inférieur à 10 nm (**Eichert et al., 2008**). La capacité des plantes à absorber les ETMs via les feuilles dépend de nombreux facteurs, tels que l'âge et la morphologie des feuilles, la densité stomatique, l'intensité de respiration ou la forme et la densité du feuillage (**Liu et al., 2012 ; Coccozza et al., 2013**).

5.2. Absorption racinaire

Le transfert racinaire des ETM est lié à leur biodisponibilité dans les sols qui dépend des formes chimiques sous lesquelles ils sont présents dans le sol et de l'aptitude de l'organisme à les absorber (**Morel, 1996**) (Figure. 2).

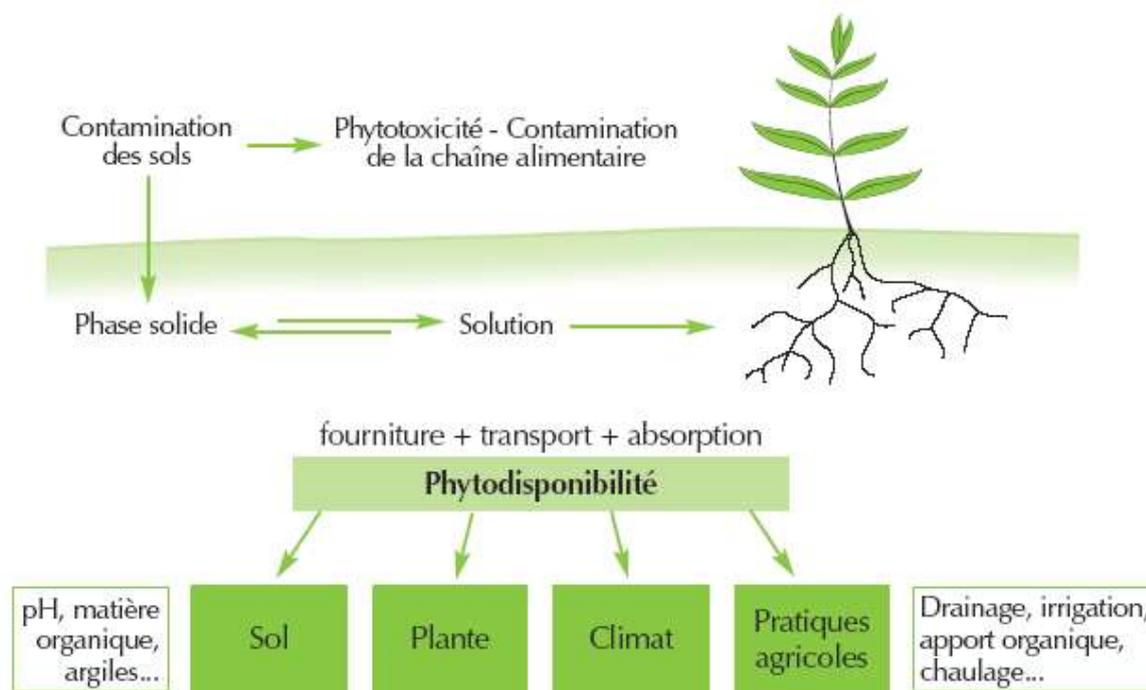


Figure 2. Phytodisponibilité des ETMs dans les sols (Morel, 1996).

Les plantes prélèvent des espèces solvatées. Il est nécessaire que l'élément passe en solution pour être absorbé par la racine. Actuellement, on estime que pour la majorité des métaux et métalloïdes, le prélèvement se fait sous des formes ioniques : cationiques (Zn^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+}) ou anioniques ($HAsO_4^{-2}$) (Lyubenova et Schröder, 2010). Les ETMs pourraient pénétrer dans la racine par diffusion passive (sans implication d'énergie et de processus métaboliques) ou par voie active (nécessitant une dépense d'énergie et l'implication de transporteurs) (Kabata-Pendias, 2011).

Dans des cas particuliers, des complexes inorganiques et/ou organiques semblent jouer un rôle dans le prélèvement des métaux. Par exemple, une augmentation du prélèvement de Cd est observée en présence de chlorures, suggérant que soit les complexes $CdCl^+$ et $CdCl_2$ sont directement absorbés, soit ils pourraient participer à la diffusion vers les racines (Smolders et al., 1998). Pour certains métaux tels que Fe, Zn, Cu et Pb, des formes complexées par des ligands organiques semblent intervenir dans le prélèvement. Par exemple, des complexes Pb-EDTA ont été identifiés dans les plantes, suggérant que ces complexes soient directement absorbés ou participent à l'absorption (Kopittke et al., 2011; Saraswat et Rai, 2011).

Cependant, l'absorption des ETM adsorbés aux parois cellulaires semble être contrôlée par le gradient de potentiel électrochimique entre le cytosol et l'apoplaste, lequel a une sélectivité assez faible (Clemens et al., 2002). Ainsi, l'absorption d'un élément dépend des

concentrations et de la nature des autres éléments avec lesquels il est en compétition. Par exemple, les ions Cd^{2+} semblent être en compétition pour les mêmes transporteurs transmembranaires avec les éléments essentiels comme Ca, K, Fe, Mg, Mn, Cu, Zn et Ni (Benavides et al., 2005).

6. Translocation des ETM des racines vers les parties aériennes

Après l'absorption par les racines, la translocation correspond au transfert des éléments traces métalliques vers les parties aériennes. Elle peut varier considérablement en fonction du métal, mais également de l'espèce végétale (Godbold et Kettner 1991). Les concentrations en ETM sont généralement plus élevées dans les racines que dans les parties aériennes (Sinha, 1999 ; Lakhdar et al., 2010). Ainsi, les racines constituent une première barrière qui protège les organes aériens de la plante. L'efficacité de cette barrière dépend fortement de l'espèce végétale ainsi que de l'élément. En effet, Cd et Zn sont transférés vers les parties aériennes plus facilement que Pb, qui reste complexé au niveau de la racine (Seregin et Kozhevnikova, 2008 ; Carvalho Bertoli et al., 2012).

Dans la racine, les ETM peuvent être transportés par la voie symplastique (à l'intérieur de la cellule) et/ou apoplastique (à l'extérieur de la cellule). La sève xylémique est le principal moyen de transport des ions minéraux des racines vers les parties aériennes. La circulation de la sève brute se fait par poussée racinaire et par appel foliaire lors de la transpiration (Benavides et al., 2005) (Figure.3).

La translocation assez importante de Zn s'explique par le fait que cet élément est présent dans plusieurs métallos-enzymes, lipides membranaires et molécules d'ADN/ARN (Greipsson, 2011). Le cadmium, considéré comme non-essentiel pour les organismes, peut emprunter les voies de transfert des éléments essentiels, notamment Ca^{2+} , Fe^{2+} et Zn^{2+} (Seth, 2012). Pour la plupart des espèces, la majorité du plomb absorbé par les plantes réside dans les racines, et seulement une faible proportion est transloquée vers les parties aériennes. Ce transport limité des racines vers les feuilles peut être expliqué par la barrière formée par l'endoderme des racines (Tanhan et al., 2007).

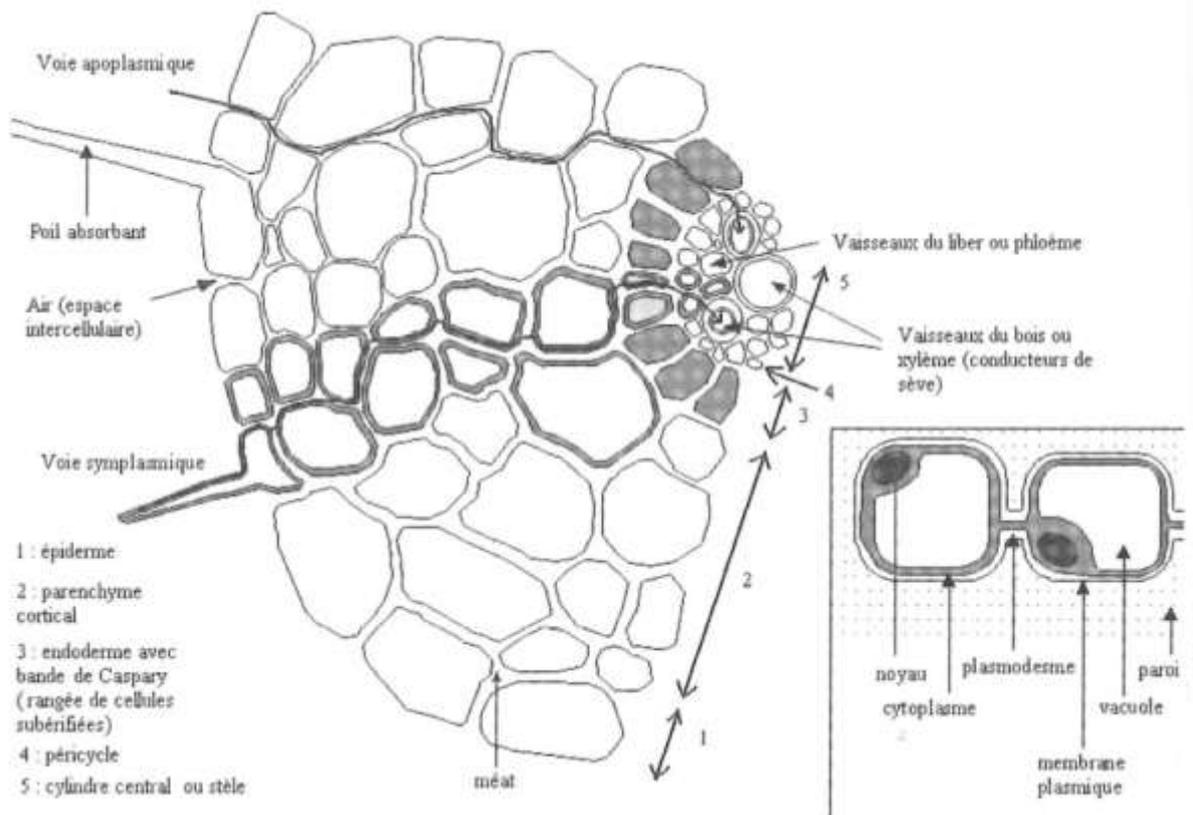


Figure 3. Coupe transversale d'une racine montrant le transport des éléments traces par voies symplasmiques et apoplasmiques (Bargagli, 1998).

7. Les principaux métaux lourds

D'un point de vue biologique, le cuivre et le zinc sont des « microéléments » ou oligoéléments: ils sont indispensables au métabolisme des êtres vivants (végétaux et animaux), on les retrouve donc dans leurs tissus mais à de plus faibles teneurs que dans les sols (< 0,01%).Cependant, aux fortes concentrations, ils pourront devenir toxiques.

Dans la suite, le cuivre et le zinc pourront être indifféremment appelés élément trace métallique (ETM) ou oligo-élément. Le terme « métal lourd », qui désigne normalement les métaux formant des précipités insolubles avec les sulfures, peut induire de nombreuses confusions entre micropolluants métalliques, oligo-éléments, et métalloïdes, ce pourquoi il sera proscrit (Marcato, 2007).

7.1.Cuivre

7.1.1. Cuivre dans les sols

Le cuivre est un des rares métaux qui existe à l'état natif dans le sol. C'est pourquoi il est utilisé par l'homme depuis très longtemps, comme l'or et l'argent. Le mot cuivre vient du latin *cuprum* signifiant « l'île de Chypre », qui était réputé pour ses mines de cuivre (**Navel, 2012**). Le cuivre (Cu ; numéro atomique 29/poids atomique de 63.5/ densité de 8.96 g.cm³) est un oligo-élément essentiel à la présence de la vie sur terre, et indispensable au bon fonctionnement de nombreuses fonctions physiologiques chez les plantes supérieures et les animaux. Il possède deux isotopes stables (63Cu à 69,2% et 65Cu à 30,8%) et 27 radioisotopes qui n'existent pas à l'état naturel. Le milieu environnemental le plus exposé au cuivre est le sol (**Shabbir et al., 2020**).

7.1.1.1.Sources de cuivre dans les sols

La teneur moyenne en cuivre de la croûte continentale est de 35 mg kg⁻¹, avec une variation entre 2 et 200 mg kg⁻¹ en fonction de nature de la roche (**Nagajyoti et al., 2010**). Le cuivre est naturellement présent dans les roches et les sols : les sols développés sur des roches d'origine sédimentaire contiennent plus de cuivre que les sols développés sur des roches de type schistes ou granites (**Fernandez-Calvino et al., 2008**), les roches les plus concentrées en cuivre sont les roches d'origine volcanique (**Kabata-Pendias, 2011**). Les minéraux cupriques viennent soit de la roche parentale soit se forment lors de processus pédologiques par substitution à d'autres cations métalliques ou par co-précipitation avec des carbonates magnésiens ou calciques, ou encore avec des oxydes de fer, de manganèse et d'aluminium (**Cetois et al., 2003**).

Les concentrations actuelles de cuivre dans des sols sont le résultat de l'accumulation de différentes sources. Ainsi, les retombées atmosphériques qui se déposent sur les sols peuvent avoir des origines naturelles telles que l'érosion éolienne, les éruptions volcaniques, les sels marins et les feux de forêts ou des origines anthropiques comme les activités industrielles, minières, agricoles et l'incinération de déchets (**Bourellier et Berthelin, 2008**). Aux retombées atmosphériques viennent s'ajouter dans les sols agricoles des apports anthropiques liés aux pratiques agricoles : fertilisation, épandages de déjections animales, de boues ou de composts, chaulage et traitements phytosanitaire.

Les niveaux de fond naturels de cuivre dans le sol variaient entre 14 et 109 mg.kg⁻¹ et

la teneur moyenne en Cu dans le sol est de 38,9 mg kg⁻¹ (Kabata-Pendias et Pendias, 2011). la concentration moyenne de cuivre dans les sédiments est 50 mg.kg⁻¹ (OMS, 2004 ; Shabbir et al., 2020).

Les teneurs limites en cuivre acceptables dans les sols sont comparables entre les organismes:

- ✓ 109 ppm [Kabata-Pendias, 2011];
- ✓ 125 ppm [Kabata-Pendias et Pendias, 1984];
- ✓ 100-105 ppm [Lai et al., 2010].

7.1.1.2. Cuivre dans les différents compartiments du sol

Dans le sol, le cuivre se complexe très rapidement à de nombreux éléments qui vont limiter sa mobilité.

On distingue généralement deux phases : solide et solution du sol (Figure.4), le cuivre étant majoritairement présent dans la phase solide du sol. La répartition du cuivre entre les différents compartiments du sol dépend de la composition minérale et organique des sols et de leurs propriétés physicochimiques comme la température, le pH, et l'humidité (H) (Bravin, 2008).

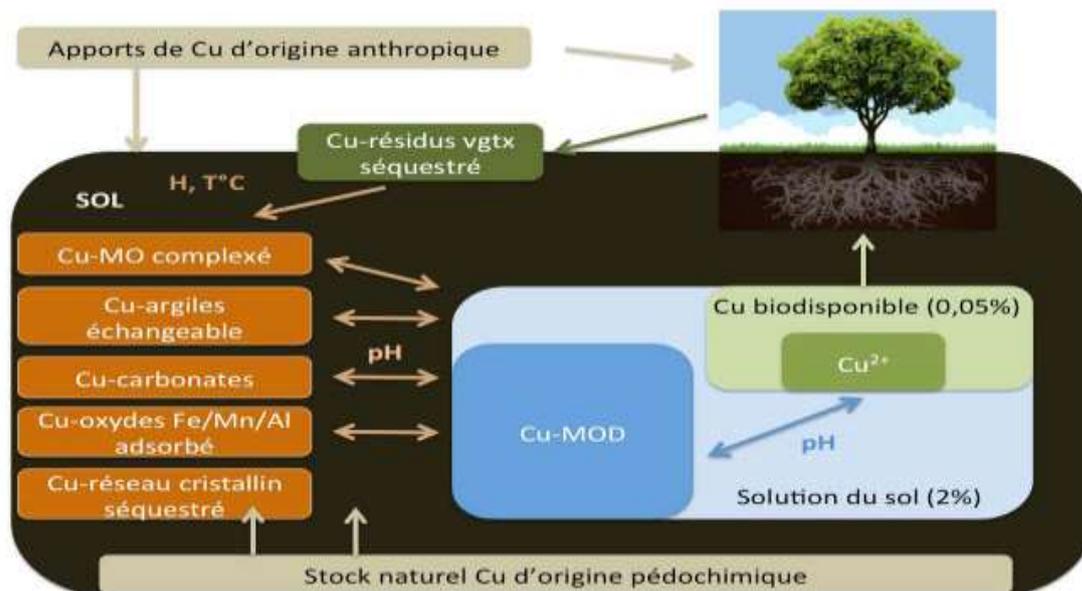


Figure 4. Différentes formes de cuivre dans le sol en fonction des échanges entre les compartiments du sol (MOD = matières organiques dissoutes, H=humidité) (Bravin, 2008)

7.1.1.2.1. Cuivre dans la phase solide du sol

Dans la phase solide du sol, le cuivre se répartit entre plusieurs compartiments. Il peut être complexé à la matière organique, aux oxydes et hydroxydes de fer, de manganèse ou d'aluminium (**Anatole-Monnier, 2014**). Il peut aussi être sorbé sur les sites négatifs portés par les argiles, ou précipité notamment avec des carbonates, ou inclus dans des minéraux. Le cuivre sorbé sous toutes ces formes peut passer en solution sous l'influence de facteurs physico-chimiques. Il prisonnier du réseau cristallin est très peu mobile compte tenu du temps nécessaire à l'altération des roches (**Oorts, 2013**). Le cuivre peut également être séquestré momentanément dans les résidus végétaux ou animaux, il sera libéré lors de leur décomposition et de leur minéralisation. La rétention du cuivre dans la phase solide du sol est due principalement aux matières organiques et aux hydroxydes (**Bravin, 2008**), et dépend fortement du pH.

Si la fraction de cuivre lié aux oxydes de fer et d'aluminium dépend peu de la profondeur, la fraction liée à la matière organique décroît fortement au-delà de 45 cm de profondeur (**Pietrzak et Mcphail, 2004**). La matière organique peut ainsi complexer de 15 à 52 % du cuivre total du sol (**Fernandez-Calvino et al., 2008**). L'adsorption sur les différents groupements fonctionnels des matières organiques se fait généralement en faveur des groupements carboxylique et phénolique. S'il peut être en compétition avec d'autres cations pour ces groupements, le cuivre présente la meilleure affinité dans les sols acides. A pH 5, le classement par affinité des métaux divalents vis-à-vis des matières organiques donne : $\text{Cu}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ (**Bravin, 2008**).

Le cuivre peut aussi se fixer par liaison électrostatique sur les constituants portant des charges négatives. L'échange d'ions étant non spécifique, le cuivre est alors en compétition avec tous les cations présents en solution, notamment les deux cations majoritaires dans la plupart des sols : le proton, ce qui explique en partie l'effet du pH et, le calcium, ion majoritaire dans les sols calcaires (**Spadini et al., 2003 ; Sauvé et al., 1997**). Cette compétition peut faciliter la mobilité du cuivre vers la solution de sol (**Bravin, 2008**). La CEC (capacité d'échange cationique) est la capacité d'un sol à un pH donné, à retenir les cations sur ses charges négatives. Ainsi, un sol dont la CEC sera importante pourra fixer plus de cuivre par échange d'ion (**Brun et al., 2001**). Suivant les conditions physicochimiques du sol, le cuivre peut aussi précipiter avec des anions sulfures, carbonates et hydroxydes (**Kabata Pendias et Pendias, 2001**).

7.1.1.2.2. Cuivre dans la solution du sol

La fraction de cuivre présente dans la solution du sol est faible, de l'ordre de 1 à 2% de la teneur en cuivre totale du sol (Agbenin et Felix-Hennigsen, 2004). Dans la solution du sol, on trouve le cuivre sous quatre formes:

- Le cuivre chélaté à de la matière organique dissoute tels que les acides aliphatiques, les acides aminés, les acides phénoliques, les peptides, les protéines, les polysaccharides ou les acides humiques et fulviques (Sposito, 1989 ; Stevenson, 1994, Kabata Pendias et Pendias, 2001) ;
- Le cuivre sorbe sur des colloïdes de taille infra-micrométrique, de nature chimique variée ;
- Le cuivre complexé à des ligands inorganiques comme OH^- , $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$, $\text{H}_2\text{PO}_4^-/\text{HPO}_4^{2-}$, Cl^- , SO_4^{2-} , S^{2-} ;
- Le cuivre sous forme ionique libre : $\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$.

La liaison à des ligands inorganiques est moins stable que celle à des ligands organiques. De par, leur forte affinité avec le cuivre, les complexes organiques dominent donc la spéciation du cuivre dans la solution du sol (Ma et al., 2006). Ainsi entre 80 et 99% du cuivre soluble total est complexé à la matière organique dissoute (Vulkan et al., 2000, Aldrich et al., 2002). Dans la solution du sol, le cuivre est donc le plus souvent complexé à de la matière organique dissoute (Cu-MOD) mais on le trouve également sous sa forme libre Cu^{2+} .

Le cuivre sous forme ionique Cu^{2+} est très fortement minoritaire : L'activité de Cu^{2+} libre dans la solution du sol se situe généralement autour de 1 μM dans les sols neutres non contaminés, de 1 à 10 μM dans les sols acides contaminés, mais jusqu'à 100 μM dans les cas des sites miniers très contaminés (Vulkan et al., 2000).

7.1.2. Cuivre dans la plante

Le cuivre étant un oligo-élément essentiel pour les plantes, c'est pourquoi des mécanismes d'absorption puis de transfert vers les organes existent car une déficience en cuivre est préjudiciable à la croissance des plantes. Mais à forte dose, le cuivre devient phytotoxique (Wheeler et Power, 1995). Le seuil de tolérance est variable selon les espèces végétales et les organes cibles.

7.1.2.1. Cuivre, un oligo-élément pour les plantes

Le cuivre est un des 7 oligo-éléments (Zn, Mn, Fe, B, Mo, Cl), indispensable à faible dose aux plantes. Au niveau du métabolisme de la plante, suivant son état d'oxydation, le cuivre joue un rôle important dans de multiples systèmes enzymatiques tels que la photosynthèse, la respiration, l'alimentation, la fertilité ou la détoxification (**Adress et al., 2015**).

Le cuivre est un des constituants de protéines impliquées dans la photosynthèse comme les plastocyanines des chloroplastes. Son rôle de cofacteur dans le transport d'électrons du photosystème II est également primordial (**Marschner, 1995**). Il intervient dans la constitution de protéines engagées dans le processus de la respiration mitochondriale (cytochromeoxydase), des réactions d'oxydation de l'acide ascorbique (ascorbate oxydase) et de la détoxification de radicaux superoxydes (superoxyde dismutase) mais aussi de la synthèse de lignine de la paroi cellulaire (peroxydases et phénols oxydases), (**Clemens, 2002**). Le cuivre intervient dans le métabolisme et la distribution des hydrates de carbone, des lipides, de la réduction et de la fixation de l'azote (**Marschner, 1995**). Il intervient dans le contrôle hydrique en influençant la perméabilité à l'eau des vaisseaux xylèmes (**Kabata Pendias, 2011**). Il est intéressant de noter que le cuivre joue également un rôle dans le processus de coloration en jaune des fleurs et la production de graines (**Nakayama et al., 2000**).

Des mesures réalisées sur plusieurs dizaines d'espèces végétales, ont permis de déterminer une concentration optimale comprise entre 2 à 30 mg Cu/kg MS (matière sèche) dans les parties aériennes pour la croissance des plantes. Cette fourchette doit ensuite être affinée pour chaque espèce, voire pour chaque variété, en fonction de ses capacités homéostatiques (**Whitby et al., 2018**). Une carence ou un excès de cuivre sont néfastes au bon développement de la plante.

Les symptômes visuels de déficience en cuivre sont difficiles à détecter car ils ne sont pas typiques et peuvent être confondus avec d'autres (**Loué, 1993**). Les jeunes organes aériens plus sensibles, sont les premiers à développer des symptômes de déficience en cuivre (**Kabata Pendias, 2011**). Les principaux symptômes macroscopiques sont une altération du développement des pollens, des troubles de l'épiaison sur céréales, une décoloration blanche du bout des jeunes feuilles (**Loué, 1993**), un défaut de turgescence des feuilles lorsque les vaisseaux du xylème sont insuffisamment lignifiés (**Kabata Pendias et Pendias, 2001**). En outre, en cas de carence en cuivre, on observe une augmentation de l'absorption de

manganèse pouvant entraîner une toxicité à ce métal. Enfin dans les cas de déficiences en cuivre les plus graves, la mort des jeunes pousses survie. Le diagnostic d'une déficience en cuivre est confirmé lorsque la teneur en cuivre de jeunes feuilles est inférieure à 4 mg/kg (Loué, 1993).

7.1.2.2. Phytotoxicité cuprique

Au-delà de 20 à 100 $\mu\text{g.g}^{-1}$ MS, ce sont les symptômes de toxicité en cuivre qui apparaissent, inhibant la croissance de racines avant celle des parties aériennes, il provoque d'abord une rhizotoxicité qui s'exprime par une coloration brune des racines, une diminution de la formation des poils absorbants, une diminution de l'élongation racinaire (Kopittke et Menzies, 2006), un épaissement des racines (Panou-Filothéou et Bosabalidis, 2004) et une diminution de la biomasse racinaire avant d'affecter la croissance des parties aériennes (Bravin, 2008).

Au niveau des parties aériennes, les symptômes observés sont des atteintes du feuillage telles que des déformations, des décolorations jaunes internervaires caractéristiques des chloroses ferriques (Michaud et al., 2007) induite par un excès de cuivre.

A l'échelle cellulaire, le cuivre provoque l'inhibition de la division (Eleftheriou et Karataglis, 1989), et de l'élongation cellulaire par augmentation de la rigidité des parois du fait du remplacement des ions Ca^{2+} par les Cu^{2+} dans l'apoplasme (Arduini et al., 1994). La ramification racinaire augmente mais les racines ne se développent pas et restent à l'état de renflement au niveau subapical (Bravin, 2008). De plus, l'excès de cuivre, stocké dans les vacuoles des cellules situées sous l'endoderme des racines pour éviter le transfert du cuivre vers les parties aériennes, peut provoquer des ruptures au niveau des racines qui sont alors coupées en deux (Kopittke et al., 2011).

Cette toxicité peut se traduire par une déficience en fer et une chlorose en conséquence du dérèglement de la peroxydation des lipides et de la destruction des membranes. En sol, la toxicité du cuivre est rarement observée du fait des fortes liaisons du métal pour les différentes composantes du sol (Kopittke et Menzies, 2006).

Exposées à une concentration excessive de cuivre, les plantes sensibles subissent un ralentissement de leur croissance et un stress oxydatif qui influe sur les activités des enzymes de détoxification des radicaux libres et augmente la peroxydation lipidique (Landberg et Greger 2002). Il existe également une augmentation des agents antioxydants comme le GSH et l'ascorbate dans les cellules (Wang et al., 2006).

Chapitre II : Métaux lourds dans le sol et le végétal

Ce stress oxydant induit une chlorose et une nécrose des feuilles (**Drażkiewicz et al., 2004**). Le métabolisme hydrique est également perturbé, et le taux de protéines est diminué (**Jouili et El Ferjani 2003**). Il perturbe le métabolisme lipidique et la structure membranaire (**Ouariti et al., 1997**). Le cuivre peut augmenter ou diminuer le taux de chlorophylle foliaire et modifie la fluorescence chlorophyllienne et l'activité du photosystème II (**Pätsikkä et al., 2002**). L'excès de cuivre a également un effet cytotoxique, qui se manifeste par une diminution de l'indice mitotique des cellules méristématiques racinaires (**Yildiz et al., 2009**).

Comme le cadmium, le cuivre peut être génotoxique, et causer des aberrations chromosomiques visibles au cours de la mitose, à type de ponts chromosomiques ou de métaphases « collantes » conduisant à une fragmentation des chromosomes (effet clastogène).

Il désorganise également le fuseau mitotique, provoquant des délétions chromosomiques (effet aneugène) (**Souguir et al., 2008**). Ces deux derniers effets provoquent à la fin de la mitose la formation de micronoyaux. La fréquence de micronoyaux est augmentée dans les racines de *Vicia faba* et *Pisum sativum* à partir de 2,5 mM de CuSO₄ pour une exposition de 42h en milieu liquide. Par contre, d'après **Steinkellner et al. (1998)**, le sulfate de cuivre n'induit pas de micronoyaux dans les cellules filles méristématiques de *Vicia faba* et *Allium cepa* après une exposition de 2h en milieu liquide suivie d'une période de récupération de 36h, pour des concentrations allant jusqu'à 125 mM. Le cuivre cause également des dommages génotoxiques visibles par le test des comètes dans les méristèmes racinaires d'*Allium cepa* (**Yildiz et al., 2009**).

7.1.2.3. Teneurs en cuivre dans la plante

De nombreuses études ont été réalisées afin de déterminer les seuils de biodisponibilité environnementale et toxicologique. Or, ces seuils sont extrêmement variables d'une espèce végétale à l'autre et en fonction des conditions expérimentales. La mesure de la teneur en cuivre dans la plante permet de connaître à la fois ses capacités d'absorption, de stockage et d'homéostasie, c'est pourquoi elle est souvent utilisée en complément de l'observation des symptômes.

La plupart des plantes ont des teneurs en cuivre dans les racines plus élevées que dans les parties aériennes car elles stockent préférentiellement le cuivre dans les racines afin de limiter sa translocation vers les parties aériennes du fait du stress oxydatif qu'il peut y

engendrer (**Ghazaryan et al., 2019**). Les valeurs seuils de toxicité pour les racines sont donc différentes des valeurs seuils de toxicité pour les parties aériennes.

Pour les racines, la concentration moyenne se situe entre 15 et 25 mg Cu/ kg mais peut atteindre de 40 à 24 700 mg Cu/kg lors de fortes contaminations (**Brun et al., 2001, Chaignon et al., 2003, Michaud et al., 2007**) en fonction des espèces végétales. L'accumulation du cuivre se situe surtout dans les racines fines de diamètre inférieur à 2 mm et pas dans les racines pivotantes (**Chopin et al., 2008**). Les grosses racines servent de zone de stockage temporaire tandis que les racines fines sont plus réactives du fait d'une respiration et d'une activité enzymatique plus élevées (**Morinaga et al., 2003**). Par conséquent, ces dernières assimilent et absorbent davantage les éléments traces (**Brun et al., 2001**) et sont les premières touchées en cas de phytotoxicité.

Les concentrations moyennes de cuivre dans les feuilles se situent autour de 5 mg Cu/kg et peuvent atteindre de 10 à 49 mg Cu/kg en cas de contamination cuprique (**Michaud et al., 2007**). Normalement, la distribution du cuivre dans les feuilles est relativement uniforme. Mais en cas de contamination cuprique, les concentrations les plus élevées dans les parties aériennes sont observées chez les jeunes organes lors des phases de croissance intensive et dans les graines des céréales (**Kabata Pendias, 2011**).

7.1.2.4. Absorption et distribution dans la plante

Le cuivre reste fixé en majorité dans la racine des plantes, stocké surtout sur les parois cellulaires (**Sela et al., 1988**). Le fait que certaines cellules racinaires soient très affectées et d'autres pas laisse supposer que *Zea maïs* possède un mécanisme de défense basé sur le « sacrifice » de certaines cellules qui accumulent le métal afin de préserver les autres (**Ouzounidou et al., 1995**). Chez *Phaseolus vulgaris*, le cuivre est fixé majoritairement dans les feuilles aux concentrations bénéfiques alors qu'il est stocké dans la racine aux concentrations toxiques (**Cuyper et al., 2000**).

Aux concentrations bénéfiques pour la plante, le cuivre possède plusieurs familles de transporteurs (**Markossian et Kurganov, 2003**). Aux concentrations toxiques, d'autres mécanismes se mettent en place. Comme le cadmium, le cuivre est un inducteur de la synthèse de phytochélatines, mais dans une moindre mesure (**Hall, 2002**). Les PC peuvent le chélater et le stocker dans la vacuole afin de le détoxifier. Chez la tomate *Lycopersicon esculentum*, il induit la synthèse de nicotianamine, un acide aminé supposé prendre en charge

le transport et/ou la détoxification du métal. La nicotianamine serait la molécule permettant la translocation du cuivre des racines jusqu'aux feuilles par le xylème (**Pich et Scholz 1996**).

Bien que Cu soit majoritairement présent sous forme complexée par des exsudats racinaires ou des ligands organiques du sol dans l'environnement racinaire (**Graham, 1981**), la forme libre semble être la seule absorbée par les racines conformément à la théorie de l'ion libre (**Adriano, 2001**). Cependant, des travaux suggèrent que Cu complexé par des ligands organiques (anions organiques, phytosidérophores) pourrait être prélevé directement sans dissociation préalable du complexe formé avec ces ligands (**Xuan et al., 2006**). D'autre part, Cu est très fortement lié aux groupes fonctionnels de l'apoplasme dans les racines (**Mengel et Kirkby, 2001**).

7.2.Zinc

7.2.1. Généralités

Le zinc (Zn), de numéro atomique 30, est le 24ème élément le plus abondant sur Terre. Il est classé dans la catégorie des éléments de transition dans le tableau périodique et fait partie du groupe 12, dans la période 4 et dans le bloc d. Sa dernière orbitale d est donc remplie, ce qui lui donne des propriétés chimiques particulières et essentielles en biologie (**Broadley et al., 2007**).

La teneur moyenne en zinc dans la croûte terrestre serait comprise entre 70 et 132 mg/kg (**Baize, 1997**). Les roches mafiques contiennent toutefois un peu plus de Zn (80 à 120 mg/kg) que les roches acides (40 à 60 ppm). Les roches des sédiments argileux et les schistes renferment comme les roches mafiques 80 à 120 mg/kg de Zn. Les roches carbonifères et les grès en sont pauvres, ne contenant que 10 à 30 mg/kg (**Kabata-Pendias et Pendias, 1992**).

De nos jours, les industries métallurgiques et minières sont les principales sources de production et d'émissions de zinc. Cependant, l'agriculture, avec les engrais et les fumiers, les boues d'épurations, le lessivage de surfaces galvanisées, les combustibles fossiles ou encore les pneus en caoutchouc constituent d'autres sources importantes d'émissions de zinc dans l'environnement (**Alloway, 2013**).

7.2.2. Zinc dans le sol

Les teneurs en zinc dans les sols varient entre 10 et 300 mg.kg⁻¹ et sont en moyenne de 50 mg.kg⁻¹. En contexte contaminé, si la concentration en Zn dans le sol dépasse 300 mg kg⁻¹,

un effet toxique sur différentes espèces de micro-organismes du sol apparaît, réduisant leur capacité de dégradation des débris végétaux et de fixation de l'azote atmosphérique (**Pais et Benton, 2000**).

Les principaux minerais de zinc les plus répandus dans la nature sont la sphalérite (ZnS), des carbonates ZnCO₃ (smithsonite ou calamine) et les silicates tel que la willémité (Zn₂SiO₄) (**Bihouix et Guillebon, 2010**).

Les teneurs limites en zinc acceptables dans les sols sont comparables entre les organismes:

- ✓ 300 ppm [FAO, 1975 ; Cottenie, 1977];
- ✓ 300 ppm [OMS, 1975];
- ✓ 150-300 ppm [UNEP, 1994];
- ✓ 300 ppm [AFNOR, 1998 ; Baize, 2000].

7.2.3. Zinc dans la plante

7.2.3.1. Absorption du zinc

L'absorption du zinc est en grande partie sous contrôle métabolique. De nombreux auteurs ont montré l'effet d'inhibiteurs sur le prélèvement (**Giordano et al., 1974**). Le phosphore, le fer et le cuivre peuvent entrer en compétition avec le zinc dans les processus d'absorption et de transfert.

Des travaux ont montré que le zinc est assimilé de façon majoritaire sous la forme Zn²⁺, qui est également la forme sous laquelle il est transporté dans la plante. **Kabata-Pendias et Pendias (2011)** ont rapporté une relation linéaire entre la concentration dans la solution du sol, ou le sol, et la concentration dans la plante. Le zinc est plus mobile au sein de la plante que le cuivre, cependant, les racines contiennent plus de grandes quantités que les parties aériennes, en particulier lorsque les apports sont importants. Dans le cas d'une consommation de luxe, le zinc peut être déplacé des racines vers les parties aériennes où ils se concentrent dans les chloroplastes, les vacuoles et les membranes cellulaires. Lors de la translocation, le zinc est chélaté à des acides organiques (**Tremel-Schaub et Feix, 2005**). Mais la mobilité du Zn vers les tissus les plus jeunes est nettement plus faible encore dans les plantes déficientes en Zn.

L'interaction entre le zinc et le phosphore sur la translocation du zinc a été rapportée par différents auteurs. Ainsi, des déficiences en zinc peuvent être induites avec des faibles doses

de phosphore du fait d'une inhibition de la translocation du zinc plus qu'une réduction de l'absorption et de la teneur dans les racines (**Chang et al., 2005**). D'autre part, certaines interactions entre éléments peuvent affecter les transports de Zn ; ce sont essentiellement des relations Fe/Zn, Cu/Zn et P/Zn. Il est incontestable que les plantes très fortement alimentées en P présentent des troubles dans le transport et le métabolisme de Zn (**Loué, 1993**).

7.2.3.2.Migration du zinc dans la plante

Les teneurs en zinc de la sève du xylème sont généralement supérieures à celles du liquide prélevé par les racines. Le zinc semble être transporté dans cette sève sous forme ionique ou lié à des acides organiques. Par contre, dans la sève du phloème, il est véhiculé sous forme complexe anionique (**White et al., 1981**).

7.2.3.3.Fonctions biochimiques du zinc

Dans les plantes, ainsi que dans d'autres systèmes biologiques, le zinc existe seulement comme Zn^{2+} , et ne prend pas part à des réactions d'oxydoréduction. Le zinc entre dans la composition d'un très grand nombre d'enzymes (plus de 300) (**Marcato, 2007**). Le zinc est particulièrement important pour le métabolisme des sucres, des protéines et des phosphates, mais il joue également un rôle par rapport à l'ADN, via des métalloprotéines impliquées dans la réplication et la transcription de l'ADN, et donc la régulation de l'expression des gènes. De plus, le zinc influence également l'intégrité et la perméabilité des membranes, et permet la protection des lipides et protéines membranaires du stress oxydant (**Marcato, 2007**).

7.2.3.4.Déficience en Zn et sa correction

La teneur moyenne de zinc présent dans les végétaux est très variable, mais elle est généralement comprise dans une fourchette allant de 15 à 70 $\mu g.g^{-1}$ MS. De plus, dans les plantes cultivées sur des sols contaminés, la concentration peut dépasser 100 $\mu g.g^{-1}$ MS, une grande proportion du métal étant concentrée dans les racines (**Broadley et al., 2007**).

Chez les végétaux, une carence en zinc entraîne des modifications morphologiques des feuilles (tailles réduites, déformations), et chez les dicotylédones, un raccourcissement de l'entre-nœud, conduisant à un raccourcissement de la tige. Les niveaux critiques de carence dans les feuilles sont estimés entre 10 et 20 $\mu g.g^{-1}$ MS (**Kabata-Pendias et Pendias, 2011**). Différents facteurs imposés par le sol peuvent être à l'origine d'une déficience en zinc : des teneurs en zinc faibles, une nature calcaire et un pH supérieur à 7, une faible teneur en matière

organique, une inactivation par les microorganismes. De plus, l'assimilation du zinc peut être réduite par les difficultés d'exploration du sol par les racines et des températures basses, ou encore des effets antagonistes (avec le cuivre, le fer ou le phosphore par exemple). Enfin, le seuil de carence est variable entre les espèces végétales (**Marschner, 2012**).

7.2.3.5.L'excès de zinc

Les concentrations considérées comme toxiques sont estimées entre 100 et 500 $\mu\text{g.g}^{-1}\text{MS}$ (**Kabata-Pendias, 2011**). Cette toxicité se traduit par une réduction de la croissance des racines et des feuilles, suivie d'une chlorose des jeunes feuilles pouvant être induite par une carence en fer ou magnésium. Le principal mécanisme de tolérance au zinc consiste en l'immobilisation du métal dans les vacuoles (**Marschner, 2012**). La production de NADPH dans les chloroplastes des végétaux est diminuée avec l'augmentation de concentration du zinc. En outre, la production de radicaux libres sera augmentée dans les plantes. La toxicité du Zinc réduit la synthèse de l'ATP et l'activité chloroplastes et la photosynthèse va diminuer en conséquence. En outre, de grandes quantités de zinc réduit l'absorption de P et Fe (**Prasad et al., 1999**).

Chapitre III

LA FEVE (Vicia

fabu L.)

1. Classification

Décrite par Linné en 1753, la fève *Vicia faba* L. est une plante dicotylédone herbacée originaire d'Asie ou du Moyen-Orient. Sa culture est très ancienne et pratiquée dans le monde entier (**Tanno et Willcox, 2006**).

Selon **Reta Sanchez et al. (2008)** ; Sa classification systématique est la suivante :

- Règne *Plantae*
- Sous-règne *Tracheobionta*
- Division *Magnoliophyta*
- Classe *Magnoliopsida*
- Sous-classe *Rosidae*
- Ordre des *Fabales*
- Famille des *Fabaceae*
- Genre *Vicia*
- Espèce *faba*

Il en existe 2 sous-espèces, *paucijuga* et *eu-faba*. Dans la sous-espèce *eu-faba* qui nous intéresse, on dénombre 3 variétés différentes (**Nuessly et al., 2004**) :

- *Vicia faba major*, la fève maraîchère à grosses graines destinées à la consommation humaine ;
- *Vicia faba minor*, la petite fève ou féverole utilisée pour l'alimentation du bétail ;
- *Vicia faba equina*, la fève à cheval à grains moyens aussi appelée féverole ou févette dans certaines régions. Comme son nom l'indique elle est également destinée à l'alimentation du bétail.

Nous avons choisi comme modèle expérimental la fève d'Aguadulce (eau douce en espagnol), un cultivar de *Vicia faba major* facile à se procurer en jardinerie et d'une bonne sensibilité aux polluants (**Rahoui et al. 2008**).

2. Aspects et particularités

La fève (*Vicia faba* L) est une plante herbacée annuelle diploïde ($2n = 12$ chromosomes) et partiellement allogame (**Wang et al., 2012**).

Chapitre III : La fève (*Vicia faba* L.)

Plante robuste, grimpante, qui peut atteindre plus d'un mètre (Peron, 2006). Elle est formée d'un appareil végétatif et d'un appareil reproducteur. L'appareil végétatif comprend : les racines, la tige et les feuilles quant à son appareil reproducteur, il est formé par les fleurs qui sont à l'origine des fruits et des graines (Wang et al., 2012) (Figure.5). Ses feuilles, composées de 2 à 7 folioles, sont alternées sur la tige de section carrée (Chaux et Foury, 1994). Ses fleurs, disposées en racème (grappe), sont blanches avec un point noir sur les ailes, zygomorphes (à symétrie axiale) et hermaphrodites, à pollinisation entomophile (Duc et al., 2015; Heuzé et al., 2016). Sa floraison dépend de la photopériode et de la température. Ses fruits sont des gousses, caractéristiques de la famille des Fabacées (Brink et Belay, 2006).

Comme chez tous les représentants de cette famille, connus sous le nom de légumineuses, les racines de la plante possèdent des nodules à l'intérieur desquelles des cellules géantes servent d'abri à une bactérie symbiotique, appartenant à l'espèce *Rhizobium leguminosarum* (Zhao et al., 2018 ; Muñoz-Romero et al., 2011). Cette bactérie est capable de capter le diazote atmosphérique et de le fixer dans le sol sous forme d'ions utilisables par les plantes (Foltete, 2010).



Figure.5. Les différentes parties de la fève *Vicia faba* L. (Thomé, 1885).

3. Variétés de *Vicia faba* L. cultivées en Algérie

Il existe quatre variétés de fèves et la féverole:

3.1. Séville

C'est une variété précoce à gousses longues, renfermant 5 à 6 grains volumineux. La tige est d'une hauteur de 70cm, se distinguant des autres variétés par la couleur de son feuillage, d'un vert assez franc (**Chaux et Foury, 1994**). Ses gousses présentent une largeur d'environ 3cm et une longueur de 25cm (**Laumonier, 2009**).

3.2. Aguadulce

C'est une variété demie précoce, très répandue en culture, elle vient d'Espagne (**Zaghouane, 2001**). Elle est caractérisée par une plante, de végétation haute de 1,10 à 1,20m. Elle possède des gousses de couleur vert franc, volumineuse et très longue, pouvant atteindre 20 à 25cm renfermant 7 à 9 graines. C'est une variété très productive (**Chaux et Foury, 1994**).

3.3. Muchaniel

C'est une variété très précoce, elle a des gousses de couleur vert clair, de 20cm de longueur en moyenne, renfermant 5 à 6 grains blancs, elle est très productive (**Chaux et Foury, 1994**).

3.4. Sidi Moussa

Elle est sélectionnée à El-Harrach en 1965, elle est convenable à tous les sols, résiste aux maladies cryptogamiques (*Botrytis*), aux insectes (*Aphis fabae*), aux plantes parasites (*Orobanche sp*) et aux nématodes (**Zaghouane, 2001**).

3.5. Féverole

Cette culture est sélectionnée par l'homme au Proche Orient ou en Afrique, elle possède un système racinaire très repoussant et structurant, et de surcroît l'une des plus performantes, en matière de fixation de l'azote (**Thomas, 2008**). Selon **Lebreton et al. (2009)**, la féverole n'est pas sensible à l'*Aphanomyces* du pois, de plus les limaces sont très peu friandes de féverole, voir les repoussent et préfèrent les autres plantes, ce qui lui donne la caractéristique d'être une plante assez facile à installer et à réussir (**Thomas, 2008**).

4. Production de la fève en Algérie

La fève (*Vicia faba* L.) est l'une des légumineuses les plus importantes au monde. La production mondiale de fèves était de 5,66 millions de tonnes métriques en 2020, ce qui représente une augmentation d'environ 23.1 % par rapport aux 4,35 millions de tonnes métriques en 1990. Au niveau régional, l'Asie est en tête avec 33,55 % de la production mondiale totale de la fève, suivie de l'Europe (UE) et de l'Afrique, avec respectivement 29,36 % et 27,04 % (FAO, 2020).

En Algérie, la fève est une légumineuse alimentaire très consommée, elle est pratiquée sur 58000 hectares, avec 44.3% de superficie et 35.7% de production .La superficie a notamment régressé depuis 1987 et se situe de nos jours autour de 45000 hectares. C'est surtout la fève qui est pratiquée, elle occupe moins de 5000 hectares des terres agricoles (Bouznad et al., 2011), tandis que sa culture subit plusieurs contraintes abiotiques telles que le froid, les gelées, la chaleur, la sécheresse et la salinité, ainsi que, les contraintes biotiques comme les mauvaises herbes, les maladies fongiques et virales, les nématodes, les insectes et l'orobanche (Duc et al ., 2015). D'autres aléas, comme l'utilisation d'une semence non certifiées, les engrais mal fractionnés, la mauvaise connaissance des produits phytosanitaires (herbicides et insecticides), ces facteurs influent sur le rendement de la fève (Mulugeta et al., 2019).

5. Exigences de la fève

La fève est localisée dans l'étage bioclimatique de 250 mm de pluie, tolère bien le froid (jusqu'à -3 et -4°C) et les hautes températures ; la somme de Températures nécessaires pour accomplir son cycle végétatif varie de 1900 à 2000 °C (Herzog, 1984). Cette plante méditerranéenne est peu exigeante sur le plan type de sol, à condition que ce dernier soit bien ensoleillé et pas trop acide. Son pH optimal se situe aux environs de 6,75, mais elle tolère bien les pH compris entre 5,5 et 8. Sa température optimale de pousse se situe aux environs de 20°C (Foltete, 2010).

6. Cycle biologique de la fève

La fève est une plante annuelle, son cycle complet, de la graine à la graine est d'environ 5 mois (Chaux et Foury, 1994). D'après Brink et Belay (2006), le développement

de la fève est caractérisé par cinq stades principaux : germination et levée, développement végétatif, développement reproductif, sénescence de la gousse et sénescence de la tige.

7. Importance agronomique

Comme toutes les légumineuses, l'espèce *Vicia faba* L. assure sa nutrition azotée par deux voix : l'assimilation de l'azote minéral du sol et la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique. Cette aptitude à fixer l'azote atmosphérique limite l'utilisation des engrais azotés qui sont coûteux pour l'agriculteur et néfastes pour la santé humaine et l'environnement (Stoddard et al., 2010). L'inclusion de la fève dans la rotation des cultures réduit le besoin d'engrais azoté inorganique et par conséquent réduit les émissions de CO₂ (Jensen et al., 2012).

Les autres avantages fournis par la fève dans les systèmes de rotation comprennent l'amélioration des propriétés physiques du sol, le maintien de la fertilité du sol et la perturbation des cycles des ravageurs et des maladies (Adekiya et al., 2017).

La valeur nutritionnelle de la fève est attribuée à sa teneur élevée en protéines. Elle est aussi une bonne source de glucides, de minéraux, de fibres et de vitamines. Par contre, la proportion lipidique est faible (Navelet et al., 2004). La fève constitue une source considérable d'énergie (344 Kcal/100g) et peut efficacement remplacer les protéines animales dans les pays pauvres (Chaieb et al., 2011).

8. Intérêt en écotoxicologie

La plante *Vicia faba* est couramment utilisée pour les études cytologiques, physiologiques, radiobiologiques et l'évaluation de la toxicité des métaux lourds (iqbal, 2016).

Les principaux avantages de l'utilisation de *V. faba* sont sa disponibilité toute l'année, son utilisation économique, sa culture et sa manipulation faciles ; son utilisation ne nécessite pas de conditions stériles ou de matériaux coûteux et son taux de division cellulaire est rapide ; les chromosomes sont faciles à évaluer pour les dommages génétiques (Kihlman, 1975; Poschenrieder et al., 1989 ; Gómez-Arroyo et al., 1997; Anwar et al., 2011). L'extrémité des cellules racinaires de *V. faba* sont couramment utilisées pour les études cytogénétiques et

Chapitre III : La fève (Vicia faba L.)

mutagènes (**Foltete et al ., 2011**). Les plantes de *V. faba* sont uniques dans leur capacité à servir d'organisme sensible, qui offre un large éventail de dommages génétiques, notamment des mutations génétiques, des aberrations chromosomiques et des dommages nucléaires (**Monarca et al., 2005 ; Leme et Marin-Morales, 2009 ; Gustavino et al., 2012**).

Deuxième partie

***ETUDE
EXPERIMENTALE***

Chapitre IV

MATERIEL

ET METHODES

1. Objectif de l'essai

L'effet combiné de la salinité et la pollution des sols par les métaux lourds porte un grand préjudice sur la pratique culturale dans la région de Mostaganem, de même, sa biodiversité est affectée. Ceci, nous amène à entreprendre des investigations dans le domaine de l'adaptation des plantes cultivées à ce genre de sols pollués et salins.

Notre but est de détecter la réaction morpho-physiologique et biochimique de la culture de la fève (*Vicia faba* L.) sous l'effet du stress métalliques (cuivre et zinc) en présence et absence de NaCl.

2. Matériel et Méthode d'étude

2.1 Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé dans notre expérimentation est la variété « super Agudulce » appartenant à l'espèce végétale « la Fève » (*Vicia faba* L., variété) de la famille des fabacées. Le choix est porté sur cette espèce végétale en raison de son utilisation comme plante modèle pour des études de toxicologie sous l'effet des différents polluants et aussi, pour sa croissance rapide et sa biomasse importante (Figure.6).

Vicia faba est une variété précoce, vigoureuse et très productive. La faculté germinative de nos graines avoisine les 85% et un taux de pureté de 99%.Cependant, les gousses présentent une taille moyenne, contenant en moyenne 6 à7 graines.



Figure 6 : Graines de *Vicia faba* L.

2.2.Méthodes d'étude

2.2.1. Préparation du substrat de culture

Le substrat utilisé correspond à un mélange de sable et de terreau industriel à des proportions respectives de (2V/1V), (Figure.7B).Le sable utilisé dans la préparation du substrat est récupéré au bord de la plage de Abdelmalek Ramdan (Mostaganem). Ce sable a subi plusieurs préparations pour son utilisation selon les étapes suivantes (Figure. 7A) :

- ✓ Différents types de tamis sont utilisés afin d'éliminer les débris végétaux, animaux et gravier, afin de récupérer que le sable fin.
- ✓ Ce sable est lavé plusieurs fois à l'eau de robinet dans le but d'éliminer les sels.
- ✓ Le sable est ensuite épandu dans la serre sur du papier journal pour subir une phase de séchage complet.
- ✓ Après séchage, ce sable est lavé à l'esprit de sel pour éliminer les sulfates, carbonates...etc.
- ✓ Puis des rinçages répétés à l'eau déminéralisée pour éliminer le chlore.
- ✓ Un test confirmatif de la désalinisation du sable est réalisé par le nitrate d'argent.

Le sable est ensuite épandu à l'air libre, sur une couche de papier journal pour subir un séchage naturel.

Tableau 5 : Caractéristiques physico-chimiques du substrat de culture.

Caractéristique	Valeur
pH eau	6,98
CEd 1/5 (dS/m)	0,412
CaCO3 Total (%)	17,49
MO (%)	2,85
CEC (meq/100g)	7,67
Ca⁺⁺	8,41
Mg⁺⁺	5,08
K⁺	0,472
Na⁺	1,631

Argile (%)	0,49
Limon (%)	1 ,03
Sable (%)	91,56
Classe texturale	Sableux

D'après les résultats indiqués dans le tableau (5), il ressort que le sol étudié est de texture sableuse, à pH légèrement acide (6.79), La teneur en matière organique est moyenne, elle est de l'ordre de 2.85% et en éléments minéraux, et sa capacité d'échange cationique est faible (CEC<9). La conductivité électrique (0,412 dS/m) traduit la faible salinité dans le sol utilisé. L'analyse de CaCO₃ montre que le sol utilisé est modérément calcaire avec un taux de 17,49% (Annexe. 01).



Figure 7 : Préparation du substrat de culture.

2.2.2. Préparation des pots

Des pots en plastique de diamètre 20cm et de 30cm de hauteur avec un poids de 3kg (Figure.8).Le fond de chaque pot est tapissé d'une couche de gravier afin d'assurer un bon drainage, sur cette couche est déposée une bande à gaze pour retenir le substrat. Il est rempli d'un mélange de sable et terreau industriel à des proportions respectives de (2V/1V).



Figure 8 : Préparation des pots.

2.3.Culture de *Vicia faba* L.

2.3.1. Localisation de l'essai

Notre expérience est menée dans une serre semi contrôlé (Figure.9), au Laboratoire de biodiversité et conservation de l'eau et des sols de l'université de Mostaganem.



Figure 9 : Serre expérimentale.

2.3.2. Germination

Les graines de *Vicia faba* L. sont sélectionnées rigoureusement en fonction de leur morphologie, leur taille, leur couleur et leur état sanitaire et conservées à l'obscurité en chambre froide (4°C). Puis, elles sont mises dans une solution d'hypochlorite de sodium à 1% pendant dix minutes pour éliminer toute contamination fongique, suivie de plusieurs rinçages à l'eau distillée pour éliminer l'hypochlorite de sodium. Enfin, les graines sont semées dans

des alvéoles remplies de tourbe selon 1 plant par alvéole, les plants sont arrosés à l'eau distillée pendant deux semaines pour assurer une bonne germination (Figure.10).



Figure 10 : Plantules de *Vicia faba* L. cultivées dans des alvéoles.

2.3.3. Repiquage de graines germées

Après la germination, les plantules de la fève (*Vicia faba* L.) sont repiquées soigneusement et mises en pots à raison de 2 plants par pot, après 15 jours au stade 5 feuilles, à ce stade de la plante, le tri est réalisé pour ne laisser qu'un plant par pot (Figure.11).



Figure 11 : Dispositif expérimental après le repiquage.

Les plantes sont conservées sous serre pendant une période de deux mois. Durant toute la période de l'expérimentation, cependant, une observation visuelle de la croissance est effectuée.

2.3.4. L'arrosage

L'irrigation est apportée avec l'eau distillée à 60 % de la capacité de rétention du substrat. La capacité de rétention est déterminée par la différence entre la quantité d'eau apportée avant l'arrosage et celle récupérée après 24h de décantation, le volume d'arrosage calculé est de 600 ml (Annexe .4). L'arrosage est effectué 3 fois par semaines, 2 fois à l'eau distillée et une fois à la solution nutritive de **Hoagland (1938)** jusqu'à l'obtention d'un matériel végétal suffisant pour les analyses (**Tableau.6**).

Tableau 6 : Composition de la solution nutritive de **Hoagland (1938)**.

Produit	Composition	Poids en g/l
Nitrate de potassium	KNO ₃	191.90
Nitrate de calcium	(NO ₃) ₂ Ca 4H ₂ O	129.80
Nitrate d'Ammonium	NO ₃ NH ₄	210
Sulfate de magnésium	SO ₄ Mg 7H ₂ O	61.5
Phosphate monopotassique	PO ₄ H ₂ K	54.40
Di-potassium	PO ₄ K ₂ H 3H ₂ O	34.23
Chlorure de manganèse	Cl ₂ Mn 4H ₂ O	1.80
Sulfate de cuivre	Cu SO ₄ 5H ₂ O	0.176
Sulfate de zinc	Zn SO ₄ 7H ₂ O	0.219
Acide borique	H ₃ BO ₃	2.861
Molybdate d'ammonium	MO ₇ O ₂ 4 (NH ₄) 7H ₂ O	0.285
Complexe ferrique EDTA ferrique	(C ₁₀ H ₁₂ FeN ₂ NaO ₈)	0.050

2.4. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental (Figure.12) adopté est en bloc randomisé avec (4) répétitions par traitement, chaque bloc est composé de :

- Plantes témoins : Irriguées avec de l'eau distillée.
- Plantes stressées au chlorure de sodium(NaCl) avec des concentrations croissantes de 100 et 200 meq/l.
- Plantes stressées au CuSO₄ avec des concentrations croissantes de 100, 300,500 ppm.
- Plantes stressées au ZnSO₄ avec des concentrations croissantes de 300, 500,700 ppm.

Chapitre IV: Matériel et Méthodes

- Plantes stressées au CuSO_4 avec des concentrations croissantes de 100, 300, 500 ppm est additionnée au chlorure de sodium (NaCl) avec des concentrations de 100 et 200 meq/l.
- Plantes stressées au ZnSO_4 avec des concentrations croissantes de 300, 500, 700 ppm est additionnée au chlorure de sodium (NaCl) avec des concentrations de 100 et 200 meq/l.

R4											
R3											
R2											
R1											
Répétitions	Témoin	100	200	100	300	500	300	500	700		
	0	NaCl (meq/l)		CuSO₄ (ppm)			ZnSO₄ (ppm)				
100+100	200+100	100+300	200+300	100+500	200+500	100+300	200+300	100+500	200+500	100+700	200+700
NaCl(meq/l)+ CuSO₄(ppm)						NaCl (meq/l)+ZnSO₄ (ppm)					

Figure 12 : Dispositif expérimental de l'essai conduit sous serre.

2.5. Application de stress

Après 45 jours de la culture de la fève, le stress métallique et salin est appliqué avec des solutions du sulfate de cuivre ($\text{CuSO}_4, 5\text{H}_2\text{O}$), du sulfate de zinc ($\text{ZnSO}_4, 7\text{H}_2\text{O}$) et de chlorure de sodium (NaCl), le stress est appliqué en deux fois pendant deux semaines (15 jours). Chaque dose utilisée dans le traitement est répétée quatre fois, dont le nombre total des plantes traitées et témoins est de 84 plantes (Figure. 13).



Figure 13 : Dispositif expérimental des plantes de *Vicia faba* L. après 75 jours du semis.

2.6. Échantillonnage du végétal

Après deux semaines de stress, les plantes âgées de 75 jours sont amenées au laboratoire. Une fois débarrassées de leur substrat, les plantes sont rincées avec l'eau de robinet. Puis séchées à l'aide d'un papier filtre. Les feuilles, les tiges et les racines sont séparées (Figure.14).

Les feuilles sont prélevées en prenant le soin de les mettre dans des sachets de papier kraft de manière à les protéger de la lumière.

Les racines ont été rincées soigneusement à l'eau du robinet pour éliminer toute trace du substrat. Chaque organe a été enveloppé dans du papier aluminium et amené au laboratoire de biodiversité et conservation des eaux et des sols du département de biologie.



Figure 14 : Prélèvement et préparation du matériel végétal.

2.7. Paramètres étudiés

2.7.1. Paramètres morpho-physiologiques

2.7.1.1. Nombre de feuilles et la croissance en longueur

A la fin de l'expérimentation, la croissance en longueur de la partie aérienne et racinaire a été mesurée après la récolte des plantes, à l'aide d'un ruban gradué en centimètre (cm). Le nombre de feuilles est évalué par le comptage des feuilles de chaque plante.

2.7.1.2. Poids frais des parties aérienne et racinaire de la plante

La biomasse des parties aériennes et racinaires est pesée pour déterminer le poids frais, ensuite, cette biomasse est passée à l'étuve pendant 72 heures à 60°C pour déterminer le poids sec.

2.7.1.3. Teneur en eau relative (RWC)

La teneur en eau relative est déterminée selon la méthode de (**Barrs et Weatherley, 1962**). Le limbe foliaire coupé à sa base, est immédiatement pesé pour déterminer le poids frais (PF). Les feuilles sont ensuite placées dans un tube à essai contenant de l'eau distillée, puis maintenu à l'obscurité à 4°C pendant 12 heures. Ces feuilles sont récupérées et essuyées délicatement avec un papier buvard et pesées à nouveau pour déterminer le poids en pleine turgescence (Ppt). Le poids sec (PS) est déterminé après passage des feuilles dans une étuve pendant 48 heures à 80°C.

La teneur relative en eau est calculée par la formule suivante

$$\text{RWC (\%)} = \frac{(Pf - Ps)}{(Ppt - Ps)} \times 100$$

P_f=poids frais;

P_{pt}=poids à saturation;

P_s=poids sec;

2.7.2. Paramètres biochimiques

2.7.2.1. Dosage des pigments chlorophylliens (mg.g⁻¹ MF)

Les pigments sont extraits des feuilles après incubation dans l'acétone 80% durant 24 heures à 4°C dans une chambre noire afin d'éviter l'excitation des chlorophylles. Les concentrations des chlorophylles et les caroténoïdes sont déterminées par spectrométrie selon la procédure citée par **Lichtenthaler (1987)**. Les équations suivantes sont utilisées pour calculer les concentrations des chlorophylles dans les feuilles (en mg/g) (**Wang et al., 2010**):

- Chlr.A = $12,25 \times A663 - 2,79 \times A645$
- Chlr.B = $21,50 \times A645 - 5,10 \times A663$
- Chlr.A+B = $7,50 \times A663 + 18,71 \times A645$

2.7.2.2. Dosage du proline (mg.g⁻¹ MS)

La méthode utilisée pour doser la proline est celle de **Troll et Lindesly (1955)** simplifiée et mise au point par **Dreier et Goring (1974)** et modifiée par **Monneveux et Nemmar (1986)**, elle consiste à prendre 100 mg du matériel végétal (1/3) médian de la feuille étandard. Puis, ajouter 2 ml de méthanol à 40%, le tout est chauffé à 85°C dans un bain-marie pendant 60 minutes. Après refroidissement, on prélève 1 ml d'extrait auquel on ajoute :

- 1 ml d'acide acétique (CH₃COOH) ;
- 25 mg de ninhydrine (C₆H₆O₄) et 1 ml de mélange contenant : 120 ml d'eau distillée ;
- 300 ml d'acide acétique et 80 ml d'acide orthophosphorique (H₃PO₄, d=1,7).

Le mélange est porté à ébullition durant 30 min, la solution vire au rouge, après refroidissement, 5 ml de Toluène sont rajoutés à la solution ; après agitation de la solution, deux phases se séparent (une phase supérieure et une phase inférieure). La phase inférieure est

éliminée et la phase supérieure est récupérée et déshydratée par l'ajout d'une spatule de Sulfate de sodium Na₂SO₄ anhydre. Enfin, on détermine la densité optique à 528 nm.

2.7.2.3. Dosage du sucre soluble (mg.g⁻¹ MS)

Les sucres solubles totaux (saccharose, glucose, fructose, leurs dérivés méthyles et les polysaccharides) sont dosés par la méthode de **Dubois et al., (1956)**. Elle consiste à prendre 100 mg de matériel végétal, dans des tubes à essai, on ajoute 3 ml d'éthanol à 80% pour faire l'extraction des sucres, puis on laisse à température ambiante pendant 48 heures. Au moment du dosage, les tubes sont placés dans l'étuve à 80°C pour faire évaporer l'alcool. Dans des tubes en verre propres, on met 2 ml de la solution à analyser, on ajoute 1 ml de phénol à 5% ; on ajoute rapidement 5 ml d'acide sulfurique concentré 96% (d = 1,86) tout en évitant de verser de l'acide contre les parois de tube. On obtient, une solution jaune orange à la surface, on passe au vortex pour homogénéiser la couleur de la solution. On laisse les tubes pendant 10 min et on les place au bain-marie pour 10 à 20 min à une température de 30°C. A ce moment-là l'absorbance est lue à une longueur d'onde de 485 nm.

2.7.2.4. Taux de protéine totale (mg.g⁻¹ MF)

La méthode retenue pour le dosage des protéines totales est celle de **Bradford (1976)** qui utilise la BSA (Sérum d'Albumine de Bovin) comme standard. Elle consiste à prendre 10 mg du matériel végétal, chaque échantillon est broyé avec 5ml d'eau distillée puis filtré et versé dans un tube à essai contenant 5ml d'eau distillée. Pour le dosage on prend 0.2ml de réactif Bradford avec 0.2 ml de la solution à analyser et 1.6ml d'eau distillée (bien agiter au vortex). Parallèlement, il est préparé un essai de contrôle en utilisant 0.2 ml d'eau distillée; après 5min à une heure on procède à la lecture de l'absorbance à 595nm.

2.7.2.5. Extraction des composés phénoliques

Préparation des extraits bruts (composés phénoliques) : Une quantité de 1 g du matériel végétal est broyée et macérée dans 20 ml du méthanol pendant 48 h. Après filtration, les solutions méthanoliques des parties concernées (tiges, feuilles, fruits) sont évaporées à sec sous pression réduite dans un évaporateur rotatif type Buchi R-200 à 60° C. Les résidus secs pesés sont repris par 3 ml du méthanol (**Benhammou et al., 2008**).

2.7.2.5.1. Dosage des phénols totaux

La teneur en phénols totaux des extraits des plantes est déterminée par la méthode de **Singleton et Ross (1965)**, utilisant le réactif de Folin–Ciocalteu. Un volume de 200 µl pour chaque extrait est introduit dans des tubes à essais, le mélange (1 ml de Folin Ciocalteu dilué 10 fois et 0.8 ml de carbonate de sodium à 7.5 %) est additionné. Les tubes sont agités et conservés durant 30 min. L'absorbance est mesurée à 765 nm en utilisant le spectrophotomètre Jenway 6405 UV/ Vis. Une courbe d'étalonnage à différente concentration d'acide gallique est préparée. Les teneurs en phénols totaux dans les extraits sont exprimées en milligramme (mg) équivalent d'acide gallique par gramme (g) du poids de la matière sèche (mg EAG/ g MS).

2.7.2.5.2. Dosage des flavonoïdes

La quantification des flavonoïdes est effectuée avec la méthode colorimétrique adaptée par **Zhishen et al, (1999)**. Une quantité de 500 µl de solution méthanolique à différentes concentrations ou de l'extrait méthanolique dilués est ajoutée à 1500 µl de l'eau distillée.

Au temps zéro, 150 µl de nitrite de sodium (NaNO_2) à 5 % est ajouté au mélange. Après 5 min, 150 µl de trichlorure d'aluminium (AlCl_3) à 10 % (m/v) est rajouté. Après l'incubation de 6 min à la température ambiante, 500 µl d'hydroxyde de sodium (NaOH) (1M) est additionné. Immédiatement, le mélange est complètement agité. L'absorbance de la solution de couleur rosâtre est mesurée à 510 nm contre le blanc. La teneur en flavonoïdes totaux des extraits des plantes de *Vicia faba* est exprimée en milligramme (mg) équivalents de catéchine par gramme (g) du poids de la matière sèche (EC)/g).

3. Analyse statistique

Les données collectées de la partie expérimentale sont analysées à l'aide du logiciel «*Stat- Box version 6.40 Pro*», la comparaison des moyennes est déterminée à l'aide du test de de Fisher-Snedecor à 5%, cependant, les graphes sont réalisés à l'aide du programme de l'Excel.

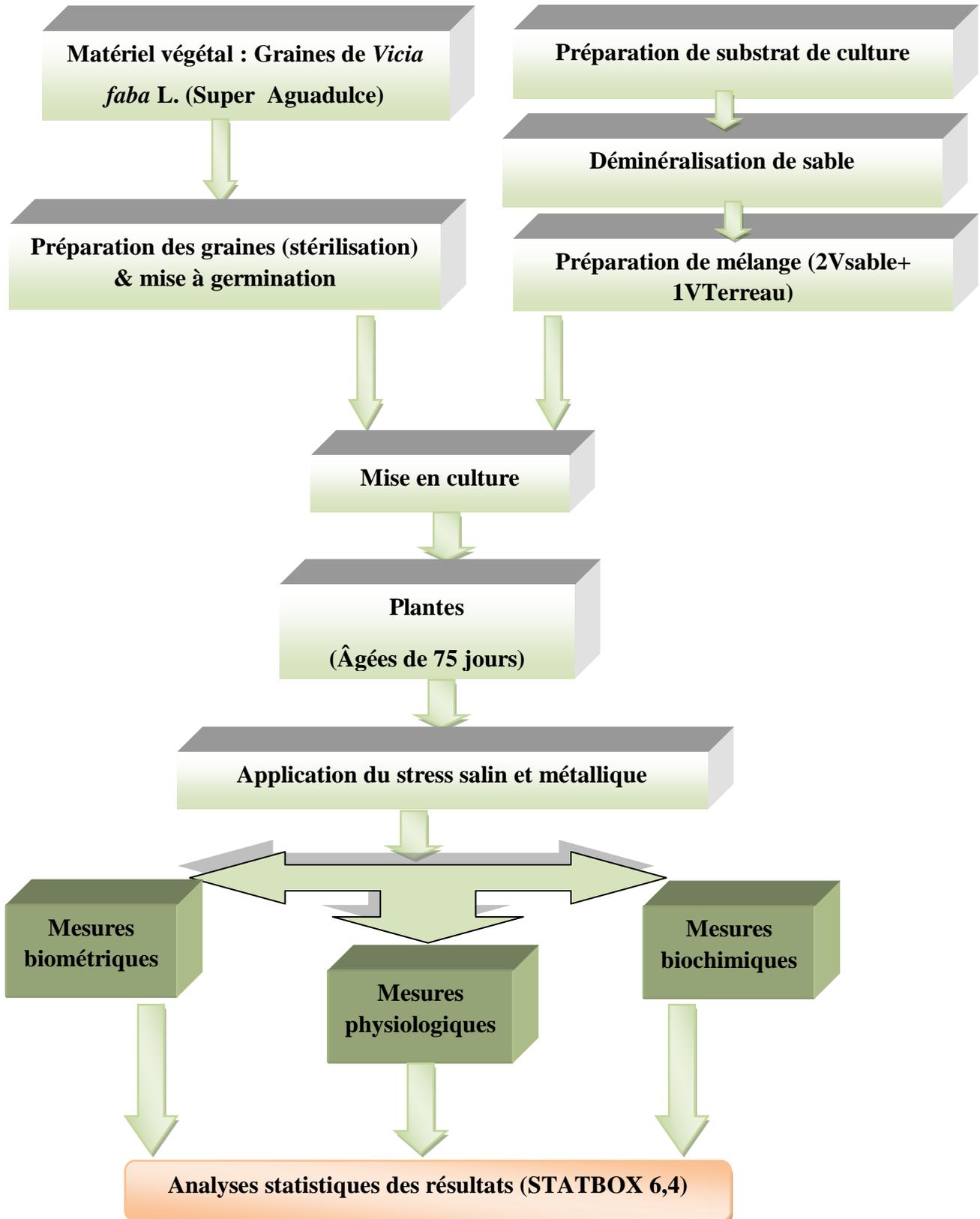


Figure 15. Organigramme montrant le protocole expérimental adopté pour l'impact de salinité et des métaux lourds (cuivre, zinc) sur *Vicia faba* L.

Chapitre V

RESULTATS

1. Paramètres morpho-physiologiques

1.1. Nombre des feuilles

1.1.1. Effet de NaCl sur le nombre des feuilles chez *Vicia faba* L.

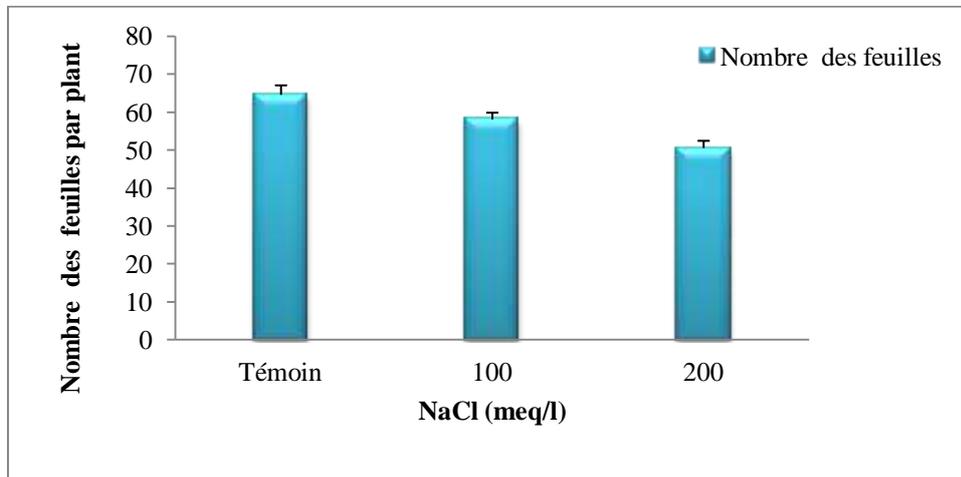


Figure16- Effet de NaCl sur le nombre des feuilles chez *Vicia faba* L.

Les résultats montrent que le nombre des feuilles diminue inversement proportionnel avec l’application des doses salines de 100 et 200 meq/l. cette diminution de nombres des feuilles est de l’ordre de 10,08 et 21,7% respectivement à 100 et 200 meq/l par rapport au témoin (figure 16).

Tableau 7- Effet de NaCl sur le nombre des feuilles chez *Vicia faba* L. ± l’écart type.

NaCl (meq/l)	Nombre des feuilles
0	64,5±1,291
100	58±1,633
200	50,5±1,252

L’analyse de la variance montre que le stress salin à un effet très hautement significatif sur le nombre des feuilles de la plante.

1.1.2. Effet de cuivre sur le nombre des feuilles chez *Vicia faba* L.

Selon les résultats obtenus (Figure.17) le nombre des feuilles diminue inversement proportionnel avec l’application des doses de Cuivre (100,300 et 500 ppm de Cu).les valeurs sont de l’ordre de 58, 52.75 et 50.5 de feuilles par plant avec une réduction de 10.08, 18.21 et

21.7 % respectivement sous l'effet des traitements 100, 300 et 500 ppm de CuSO₄ comparativement au témoin qui enregistre 64.5 de feuilles par plant (Tableau.8).

L'analyse de la variance montre un effet très hautement significatif du cuivre sur le nombre des feuilles.

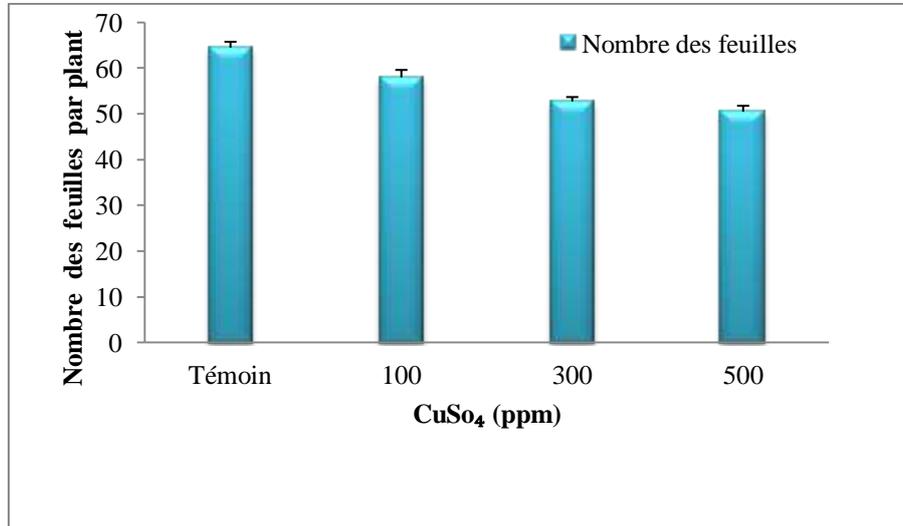


Figure17- Effet de Cuivre sur le nombre des feuilles chez *Vicia faba* L.

Tableau 8- Effet de Cuivre sur le nombre des feuilles chez *Vicia faba* L. ± l'écart type.

CuSO ₄ (ppm)	Nombre de feuilles
0	64,5±1,291
100	58±1,645
300	52,75±0,957
500	50,5±1,291

1.1.3. Effet de Zinc sur le nombre des feuilles chez *Vicia faba* L.

Les résultats obtenus (Figure.18) montrent que la diminution du nombre des feuilles de *Vicia faba* L. est inversement proportionnel avec l'application de stress en Zinc (300 ,500 et 700 ppm de Zn). Cette diminution est plus importante à la dose de 700 ppm de Zn (25,19 %) par rapport au témoin.

L'analyse de la variance montre que le Zinc a un effet très hautement significatif sur le nombre des feuilles de la plante.

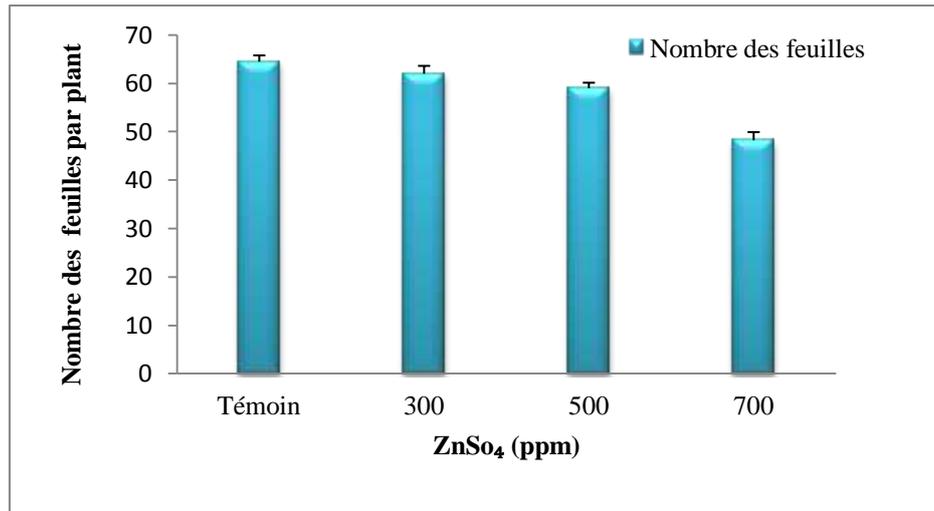


Figure18- Effet de Zinc sur le nombre des feuilles chez *Vicia faba* L.

Tableau 9 - Effet de Zinc sur le nombre des feuilles chez *Vicia faba* L. ± l'écart type.

ZnSO ₄ (ppm)	Nombre des feuilles
0	64,5±1,291
300	62±1,633
500	59,75±1,155
700	48,25±1,708

1.1.4. Effet combiné (salin et métallique) sur le nombre des feuilles chez *Vicia faba* L.

a. Effet combiné NaCl+CuSO₄

Les résultats obtenus(Figure.19) montrent que le nombre des feuilles par plant diminue inversement proportionnel avec l'application du stress salin et de cuivre comparativement au témoin.

La diminution est beaucoup plus importante à la dose de 200 meq/l de NaCl combinée avec 100,300 et 500 ppm de Cuivre(Tableau.10).

Ces résultats expriment une forte réduction de 48,06% et 47,67% respectivement pour la dose de 200 meq.l⁻¹de NaCl combiné avec 300 et 500ppm de CuSO₄ par rapport au témoin.

L'analyse de la variance révèle un effet très hautement significatif pour les deux facteurs « NaCl » et « CuSO₄ » ainsi que pour l'interaction des deux facteurs (F1xF2) sur le nombre des feuilles de la fève.

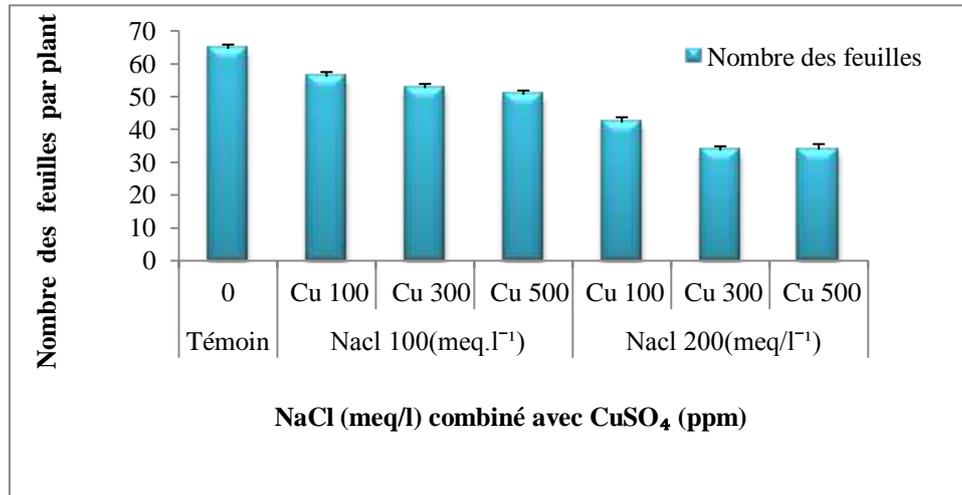


Figure 19- Nombre des feuilles de *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl-Cuivre

Tableau 10- Nombre des feuilles de *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl-Cuivre ± l'écart type

Traitement combiné		Paramètre
NaCl (meq.l ⁻¹)	CuSO ₄ (ppm)	Nombre des feuilles
0	0	64,5±1,291
100	100	56±1,414
	300	52,5±1,291
	500	50,5±1,291
200	100	42±1,633
	300	33,5±1,291
	500	33,75±1,708

b. Effet combiné NaCl+ZnSO₄

L'observation de l'évolution du nombre des feuilles montre une diminution inversement proportionnel avec l'application des doses de Zn-NaCl comparativement au témoin (Figure .20).

La diminution est beaucoup plus importante à la dose de 200 meq/l de NaCl combinée avec 300,500 et 700 ppm de Zinc, où le nombre des feuilles enregistre une diminution de 36.43%, 41.47 et 46.12% respectivement par rapport au témoin.

L'analyse de la variance montre que l'effet de Zn, NaCl et l'interaction Zn-NaCl est très hautement significatif sur le nombre des feuilles de la fève.

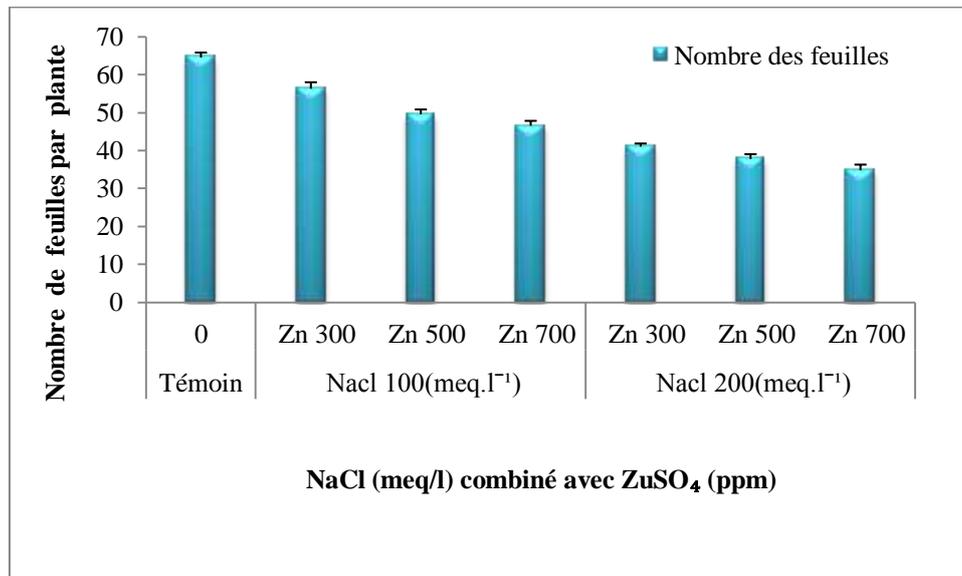


Figure 20- Nombre des feuilles de *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl-Zinc

Tableau 11- Nombre des feuilles de *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl-Zinc ± l'écart type

Traitement combiné		Paramètre
NaCl (meq.l ⁻¹)	ZnSO ₄ (ppm)	Nombre de feuilles
0	0	64,5±1,291
100	300	56,25±1,708
	500	49,5±1,285
	700	46,5±1,294
200	300	41±0,816
	500	37,75±1,258
	700	34,75±1,5

1.2. Croissance en longueur des tiges et racines de la plante

1.2.1. Effet de NaCl sur la longueur des tiges et racines chez *Vicia faba* L.

Les résultats obtenus montrent que la longueur des tiges et racines diminue inversement proportionnel avec l'application du stress salin (100 et 200 meq/l). On note que la diminution de la longueur des racines est plus importante comparativement à celle des tiges.

On observe également que la diminution de la longueur des tiges et racines est plus importante pour le traitement 200meq/l du NaCl comparativement à la dose de 100 meq /l, cette diminution est de l'ordre de 14.62 et 32.11% respectivement (tiges, racines).

L'analyse statistique montre un effet très hautement significatif du NaCl sur la longueur des tiges et racines chez la fève.

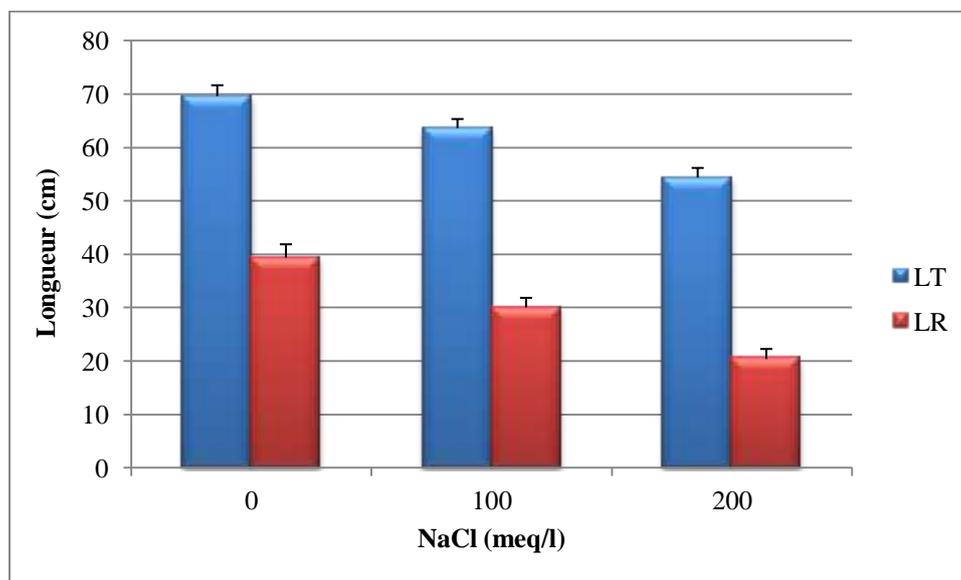


Figure21-Effet de NaCl sur la longueur des tiges et racines(Cm) de *Vicia faba* L.

Tableau 12- longueur des tiges et racines (Cm) de *Vicia faba*.L sous l'effet de NaCl± l'écart type.

NaCl (meq/l)	Longueur de tige (cm)	Longueur de racine (cm)
0	69,6±2,026	39,4±2,496
100	63,6±1,702	30,05±1,792
200	54,3±1,797	20,4±1,887

1.2.2. Effet de cuivre sur la longueur des tiges et racines chez *Vicia faba* L.

La longueur des tiges et racines de la fève diminue inversement proportionnel avec l'application des doses de Cuivre comparativement au témoin (Figure.22). La diminution de la longueur moyenne des tiges est moins considérable comparativement à celle des racines.

Cette diminution est plus importante à la dose de 500 ppm de Cu (22.13 et 52.54 %) par rapport au témoin respectivement (tiges, racines).

L'analyse statistique montre un effet très hautement significatif du cuivre sur la longueur des tiges et racines de *Vicia faba* L.

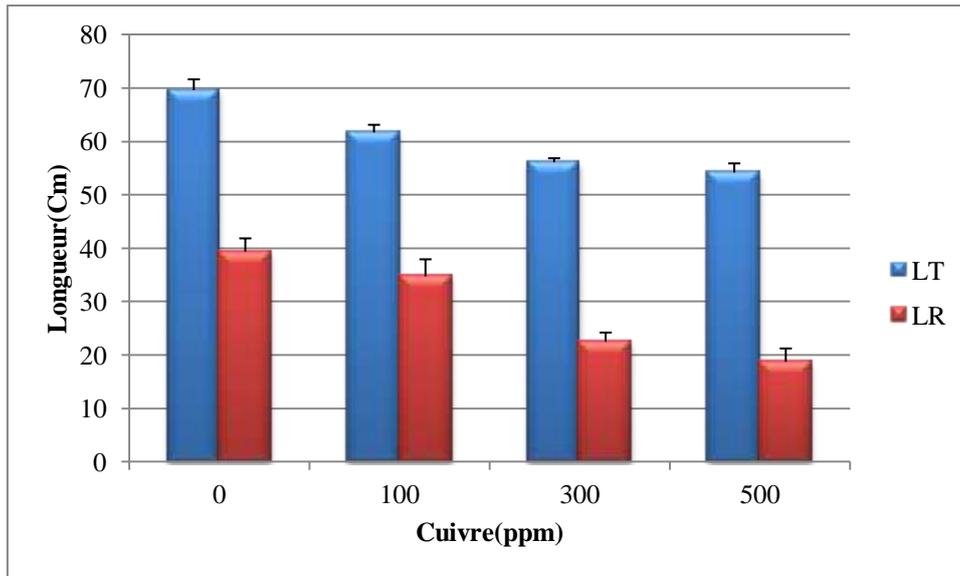


Figure 22-Effet de cuivre sur la longueur des tiges et racines (Cm) de *Vicia faba* L.

Tableau 13- longueur des tiges et racines (Cm) de *Vicia faba*.L sous l'effet de Cuivre± l'écart type.

Cuivre (ppm)	Longueur de tige (cm)	Longueur de racine (cm)
0	69,6±2,026	39,4±2,496
100	61,7±1,449	34,7±3,202
300	56,12±0,75	22,5±1,732
500	54,2±1,725	18,7±2,5

1.2.3. Effet de Zinc sur la longueur des tiges et racines chez *Vicia faba* L.

La longueur des tiges de la fève diminue inversement proportionnel avec l'application de stress en Zn (300 ,500 et 700 ppm), Cette diminution atteint son maximum à la dose de 700 ppm avec une diminution de 24.43% par rapport au témoin (Figure 23).

En revanche, Les valeurs moyennes obtenues pour la longueur des racines des plantes traitées à 300 ppm de Zn augmentent légèrement à 41cm comparativement à celle des plantes témoins (39.4 cm). Par contre, la dose de 700 ppm de Zn enregistre la plus faible longueur racinaire (28 Cm) comparativement aux autres doses appliquées (tableau 14).

L'analyse statistique montre un effet très hautement significatif du Zn sur la longueur des tiges et racines chez la fève.

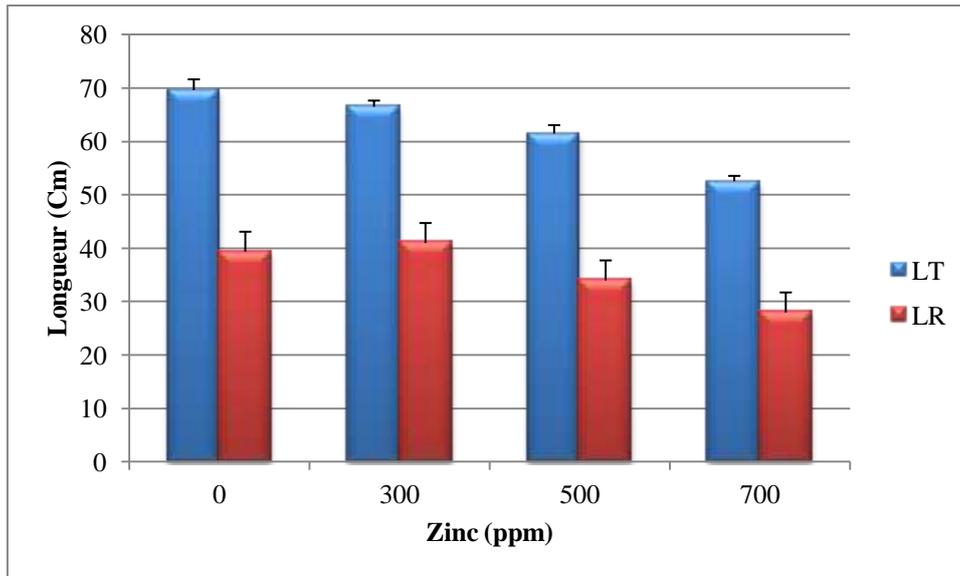


Figure23-Effet de Zinc sur la longueur des tiges et racines (Cm) de *Vicia faba* L.

Tableau 14- longueur des tiges et racines (Cm) de *Vicia faba*.L sous l'effet de Zinc± l'écart type.

Zinc (ppm)	Longueur de tige (cm)	Longueur de racine (cm)
0	69,6±2,026	39,4±2,496
300	66,5±1,173	41±3,916
500	61,5±1,568	34±3,266
700	52,6±1,008	28±3,742

1.2.4. Effet combiné (salin et métallique) sur la longueur des tiges et racines chez *Vicia faba* L.

a. Effet combiné NaCl+CuSO₄

La longueur des tiges et racines de la fève diminue proportionnellement avec l'augmentation des doses de Cu-NaCl appliquées à la plante (Figure24), La longueur moyenne des racines de la plante est moins importante comparativement à celle des tiges (Tableau 15).

On note une diminution beaucoup plus importante à la dose de 200 meq/l de NaCl combinée avec 100,300 et 500 ppm de Cuivre.

L'analyse de la variance révèle un effet très hautement significatif pour les deux facteurs « NaCl » et « CuSO₄ » ainsi que pour l'interaction des deux facteurs (F1xF2) sur longueur des tiges et racines de la plante.

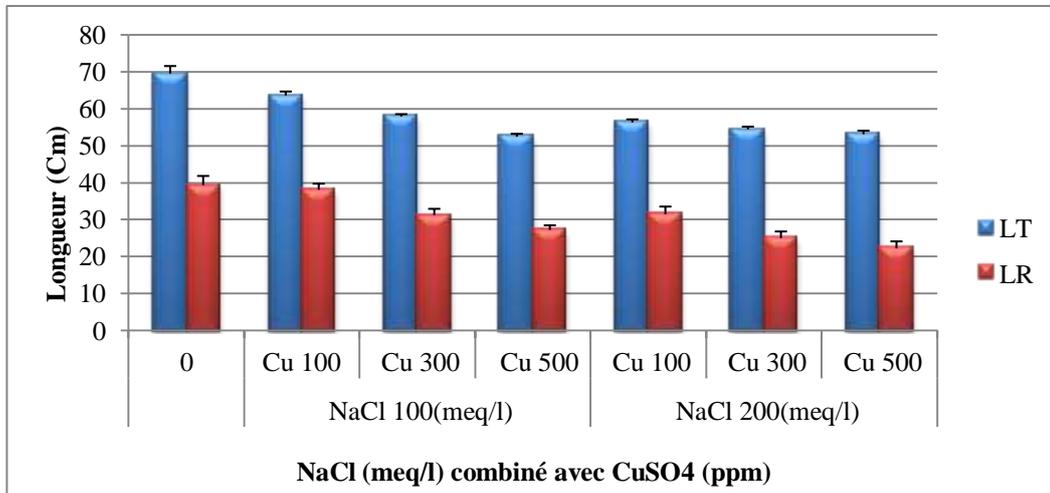


Figure 24- longueur des tiges et racines (cm) de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre.

Tableau 15- longueur des tiges et racines (cm) de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre ± l'écart type

Traitement Combiné		Longueur de la tige (cm)	Longueur de la racine (cm)
NaCl (meq/l)	CuSO ₄ (ppm)		
0	0	69,6±2,026	39,4±2,496
100	100	63,7±1,068	38,12±1,652
	300	58±0,612	31,25±1,708
	500	52,5±0,791	27,25±1,258
200	100	56,4±0,829	31,5±2,082
	300	54,5±0,736	25±1,826
	500	53,2±0,944	22,25±1,893

b. Effet combiné NaCl+ZnSO₄

La longueur des tiges diminue inversement proportionnelle avec l'application des doses de Zn-NaCl comparativement au témoin (Figure.25), la longueur des tiges de *Vicia faba* L. est largement supérieure à celle des racines.

Les plantes stressées avec 100 meq.l⁻¹ de NaCl présentent des longueurs des tiges et racines nettement supérieures comparativement à celles stressées avec 200 meq.l⁻¹ de NaCl.

La longueur des tiges et racines la plus élevée est enregistrée à la dose de 300 ppm de Zn combinée avec 100 meq/l de NaCl (63.5 et 40 cm), tandis que la plus faible longueur est enregistrée à la dose de 700 ppm de Zn combinée avec 200 meq/l de NaCl (51 et 19.5 cm) respectivement (tiges, racines), (tableau .16).

L'analyse de la variance montre que l'effet de Zn, NaCl et l'interaction Zn-NaCl est très hautement significatif sur la longueur des tiges et racines de la fève.

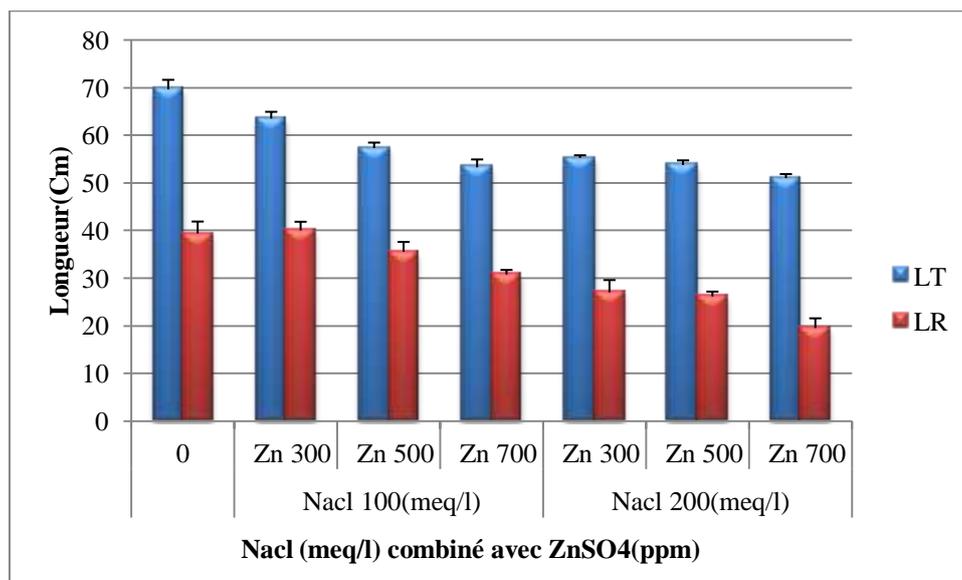


Figure25- longueur des tiges et racines (cm) de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc.

Tableau 16- longueur des tiges et racines (cm) de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc \pm l'écart type.

Traitement Combiné		Longueur de la tige (cm)	Longueur de la racine (cm)
NaCl (meq/l)	ZnSO ₄ (ppm)		
0	0	69,6 \pm 2,026	39,4 \pm 2,496
100	300	63,5 \pm 1,429	40 \pm 1,826
	500	57,3 \pm 1,143	35,5 \pm 2,082
	700	53,3 \pm 1,671	30,75 \pm 0,957
200	300	55,3 \pm 0,54	27 \pm 2,582
	500	53,8 \pm 0,979	26,125 \pm 1,031
	700	51 \pm 0,842	19,5 \pm 2,041

1.3. Teneur relative en eau des feuilles de *Vicia faba* L.

1.3.1. Effet de NaCl sur la teneur relative en eau

La teneur relative en eau des feuilles de la fève diminue inversement proportionnelle avec les doses de NaCl (Figure.26). Cette diminution est de l'ordre de 24.88 % et 35.39 % pour les doses 100 meq/l (62,2 %) et 200 meq/l (53,5 %) respectivement, comparativement au témoin (82,8 %), (Tableau.17).

La teneur relative en eau la plus importante est enregistrée à la dose de 100 meq/l de NaCl.

L'analyse statistique montre que l'effet des traitements de NaCl est très hautement significatif sur la teneur relative en eau de la plante.

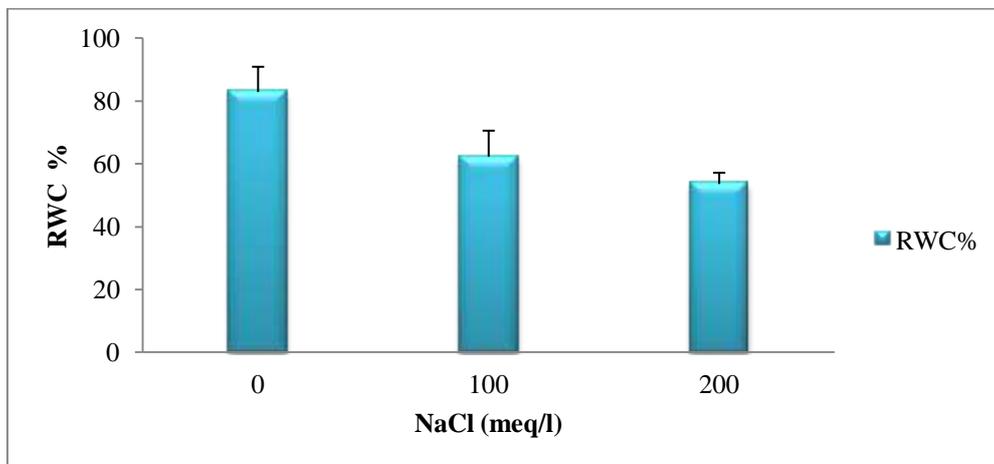


Figure 26-Teneur relative en eau (%) des feuilles de *Vicia faba* L. stressée au NaCl

Tableau 17-Teneur relative en eau (%) des feuilles de *Vicia faba* L. stressée au NaCl \pm l'écart type.

NaCl (meq/l)	Teneur relative en eau (RWC %)
0	82,8 \pm 8,032
100	62,2 \pm 8,271
200	53,5 \pm 3,574

1.3.2. Effet de Cuivre sur la teneur relative en eau

Les résultats trouvés (Figure.27) montrent que La teneur relative en eau de la fève diminue inversement proportionnelle avec l'application des doses de Cuivre (100,300 et 500 ppm), ces teneurs sont plus faibles chez les feuilles des plantes stressées (67.4, 58.11 et 50.9 % respectivement) que chez les plantes témoins (82.8 %), (Tableau .18).

La teneur relative en eau la plus importante est enregistrée à la dose de 100 ppm de cuivre.

L'analyse de la variance de l'effet du cuivre sur la teneur relative en eau de la plante montre un effet très hautement significatif.

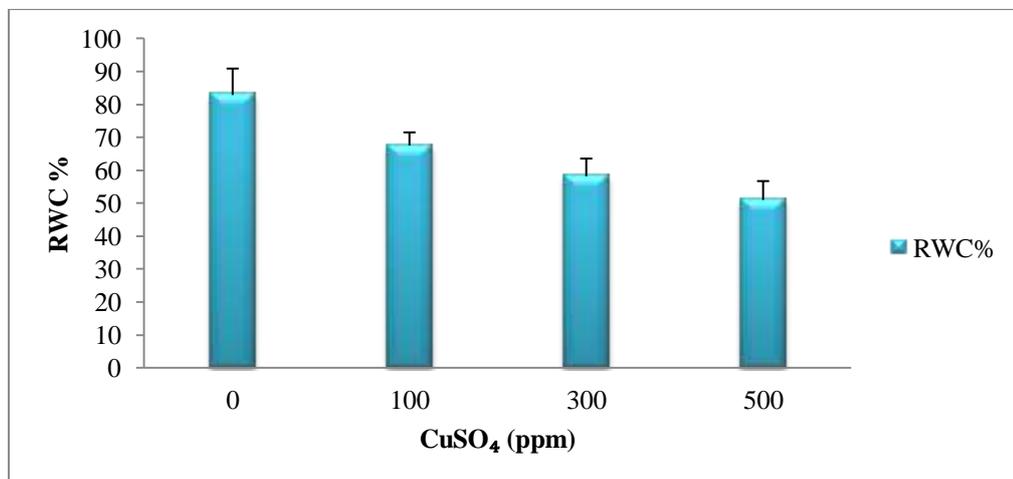


Figure 27-Teneur relative en eau (%) des feuilles de *Vicia faba* L. stressée au Cuivre

Tableau 18 : Teneur relative en eau (%) des feuilles de *Vicia faba* L. stressée au Cuivre± l'écart type.

CuSO ₄ (ppm)	Teneur relative en eau (RWC%)
0	82,8±8,032
100	67,4±3,99
300	58,1±5,377
500	50,9±5,752

1.3.3. Effet de Zinc sur la teneur relative en eau

La teneur relative en eau des feuilles de la fève diminue inversement proportionnelle avec les doses de Zn comparativement au témoin (Figure.28).

Les teneurs en eau obtenues diminuent de 22.22, 33.3, et 31.88 % pour les doses 300 meq/l (64.4%) ,500 meq/l (55.2%) et 700 meq/l (56.4 %) respectivement, comparativement au témoin (82.8%), (Tableau.19).

La teneur relative en eau la plus importante est enregistrée à la dose de 300 ppm de zinc.

L'analyse de la variance de l'effet du zinc sur la teneur relative en eau de la plante révèle un effet très hautement significatif.

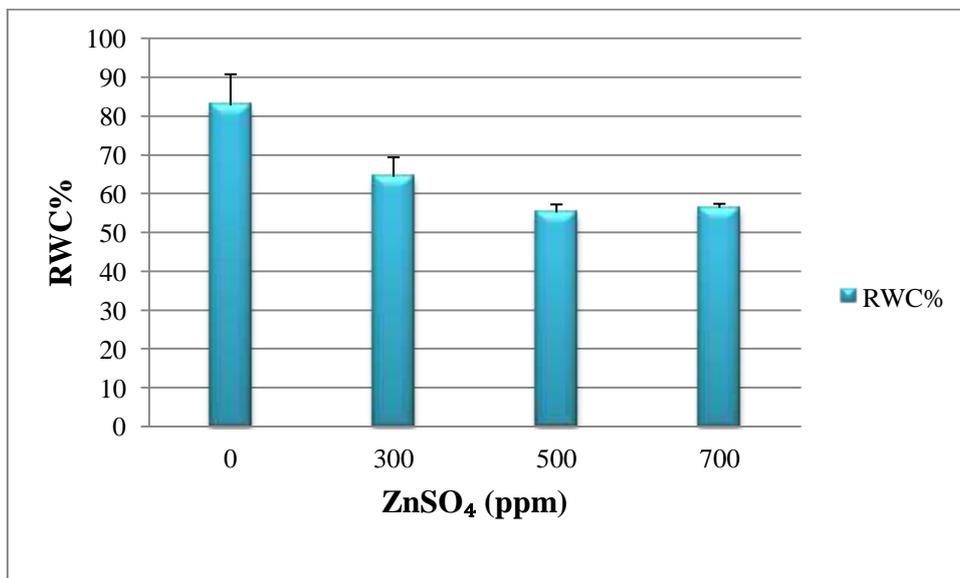


Figure 28-Teneur relative en eau (%) des feuilles de *Vicia faba* L. stressée au Zinc.

Tableau 19 : Teneur relative en eau des feuilles de *Vicia faba* L. stressée au Zinc± l'écart type.

ZnSO ₄ (ppm)	Teneur relative en eau (RWC%)
0	82,8±8,032
300	64,4±4,99
500	55,2±2,078
700	56,4±1,02

1.3.4. Effet combiné (salin et métallique) sur la teneur relative en eau (RWC%) chez *Vicia faba* L.

a. Effet combiné NaCl+CuSO₄

L'évolution de la teneur relative en eau montre une diminution inversement proportionnelle avec l'application des doses de Cu-NaCl comparativement au témoin (Figure .29).

La diminution de la teneur relative en eau est plus importante à la dose de 200 meq/l de NaCl combinée avec 100, 300 et 500 ppm de Cuivre (Tableau.20), dont les teneurs les plus faibles en eau ont été enregistrées avec un taux moyen de diminution plus basse (42.99, 51.57 et 57.13 %) respectivement par rapport au témoin.

L'analyse de la variance montre que l'effet de Cu, NaCl et l'interaction Cu-NaCl est très hautement significatif sur la teneur relative en eau de la fève.

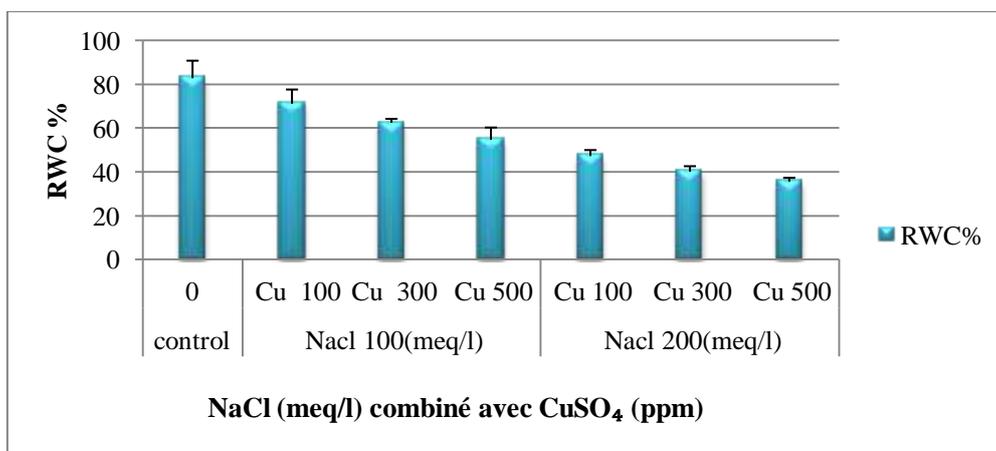


Figure 29-Teneur relative en eau (%) des feuilles de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre

Tableau 20 : Teneur relative en eau des feuilles de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre \pm l'écart type

Traitement combiné		Teneur relative en eau (RWC%)
NaCl (meq.l ⁻¹)	CuSO ₄ (ppm)	
0	0	82,8 \pm 8,032
100	100	71,1 \pm 6,496
	300	62,5 \pm 1,752
	500	54,7 \pm 5,606
200	100	47,2 \pm 2,757
	300	40,1 \pm 2,528
	500	35,5 \pm 1,815

b. Effet combiné NaCl+ZnSO₄

Les résultats obtenus (Figure.30) révèlent que la teneur relative en eau des feuilles de *Vicia faba* L. diminue inversement proportionnelle avec l'application du stress salin et de Zinc comparativement au témoin.

La diminution est beaucoup plus importante à la dose de 200 meq/l de NaCl combinée avec 300,500 et 700 ppm de Zinc (Tableau.21).

Ces résultats expriment une forte réduction de 43.12 % et 40.1 % respectivement pour la dose de 200 meq.l⁻¹ de NaCl combiné avec 500 et 700 ppm de Zinc par rapport au témoin. L'analyse de la variance révèle un effet très hautement significatif pour les deux facteurs « NaCl » et « ZnSO₄ » ainsi que pour l'interaction des deux facteurs (F1xF2) sur la teneur relative en eau de la fève.

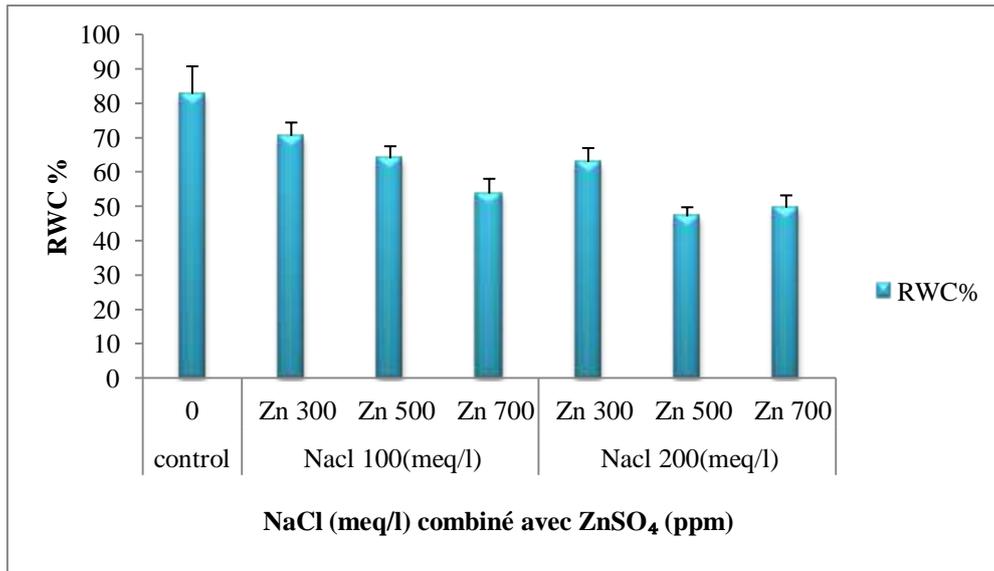


Figure 30-Teneur relative en eau (%) des feuilles de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc

Tableau 21 : Teneur relative en eau des feuilles de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc ± l'écart type

Traitement combiné		Paramètre
NaCl (meq.l ¹)	ZnSO ₄ (ppm)	Teneur relative en eau (RWC%)
0	0	82,8±8,032
100	300	70,5±3,903
	500	64,01±3,526
	700	53,8±4,279
200	300	62,9±4,09
	500	47,1±2,668
	700	49,6±3,584

1.4. Poids frais de *Vicia faba* L.

1.4.1. Effet de NaCl sur le poids frais

Le poids frais des parties aérienne et racinaire de la fève diminue inversement proportionnel avec les doses appliquées de NaCl par rapport au témoin (Figure.31). On note que les parties aériennes présentent le poids le plus élevé avec une diminution très importante de matière fraîche comparativement aux racines de la plante (Tableau.22).

La diminution du poids frais est plus importante pour le traitement 200 meq/l du NaCl comparativement à la dose de 100 meq /l, cette diminution est de l'ordre de 27.76 et 23.55 % respectivement pour les parties aériennes et racinaires.

L'analyse statistique montre un effet très hautement significatif du NaCl sur le poids frais des parties aériennes et racinaires chez la fève.

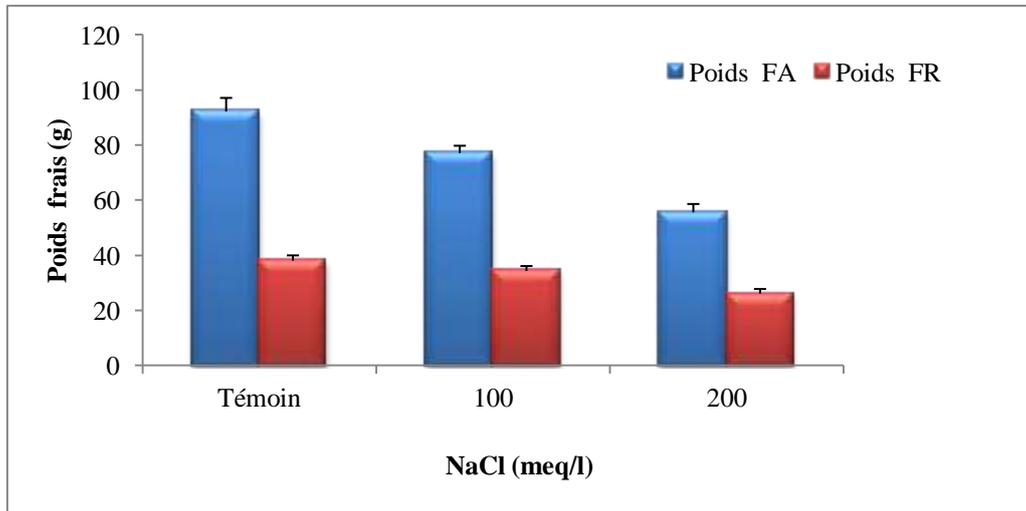


Figure 31- Poids frais moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl.

Tableau 22 - Poids frais moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl± l'écart type.

NaCl (meq/l)	Partie aérienne	Partie racinaire
0	92,3±4,943	38,1±1,923
100	77,1±2,698	34,4±1,8
200	55,7±3,029	26,3±1,631

1.4.2. Effet de Cuivre sur le poids frais

Les résultats trouvés montrent que le poids frais des parties aérienne et racinaire de la plante traitée par le Cuivre est diminué inversement proportionnel par rapport au témoin (Figure. 32).

Les parties aériennes présentent le poids frais le plus élevé avec une diminution très importante de matière fraîche comparativement aux racines de la plante.

Le poids frais présente une teneur optimale en poids frais à la dose de 100 ppm de cuivre chez les deux parties aériennes et racinaires.

Le poids frais des parties aériennes de la plante stressée au Cuivre varie de 78.83 g pour la dose de 100 ppm à 60.74 g pour la dose de 500 ppm. Par ailleurs le poids frais obtenu pour la partie racinaire varie de 31.92 g pour la dose de 100 ppm à 22.54 g pour la dose de 500 ppm de Cuivre (Tableau 23).

L'analyse statistique révèle un effet très hautement significatif du Cuivre sur le poids frais des parties aériennes et racinaires chez la fève.

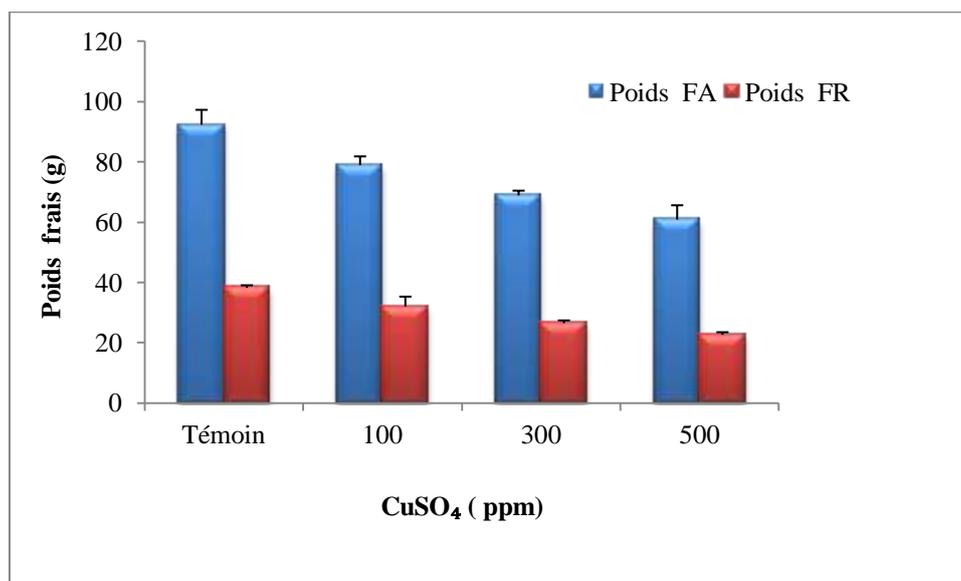


Figure 32- Poids frais moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre.

Tableau 23: Poids frais moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre± l'écart type.

CuSO ₄ (ppm)	Partie aérienne	Partie racinaire
0	92,3±4,943	38,1±0,823
100	78,832±2,919	31,922±3,291
300	68,8±1,573	26,395±0,925
500	60,745±4,788	22,538±0,876

1.4.3. Effet de Zinc sur le poids frais

Le poids frais des parties aérienne et racinaire chez la fève diminue inversement proportionnel avec les doses du Zinc appliquées à la plante (Figure.33). On note que les parties racinaires présentent le poids frais le plus faible comparativement aux parties aériennes de la plante avec une diminution moins importante de matière fraîche par rapport au témoin.

Le poids frais présente une teneur optimale en poids frais à la dose de 300 ppm de zinc chez les deux parties aériennes et racinaires.

L'analyse statistique révèle un effet très hautement significatif du Zinc sur le poids frais des parties aériennes et racinaires chez la fève.

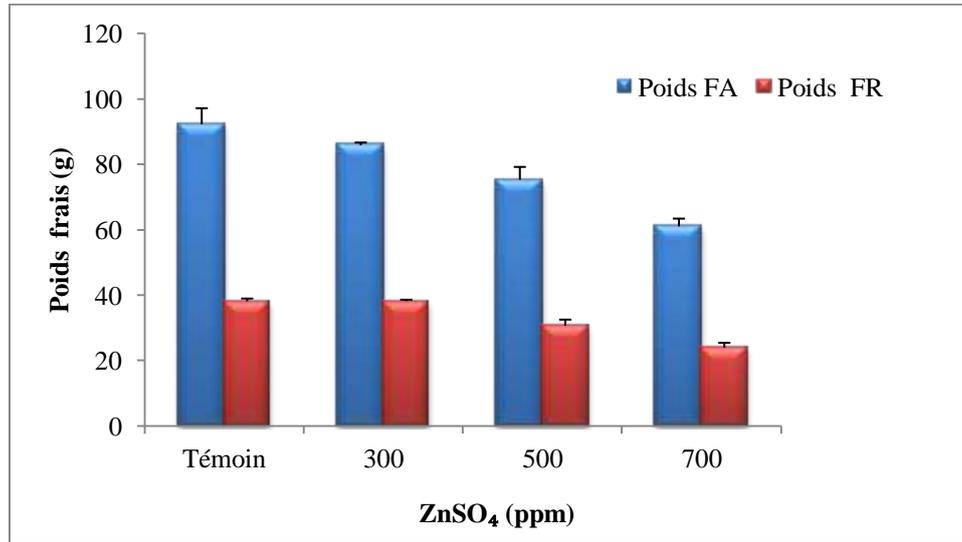


Figure 33- Poids frais moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc.

Tableau 24: Poids frais moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc ± l'écart type.

ZnSO ₄ (ppm)	Partie aérienne	Partie racinaire
0	92,3±4,943	38,1±0,823
300	85,832±0,861	38,172±0,442
500	75,3±3,934	30,645±1,877
700	61,045±2,378	23,888±1,543

1.4.4. Effet combiné (salin et métallique) sur le poids frais chez *Vicia faba* L.

a. Effet combiné NaCl+CuSO₄

Les résultats de la figure (34) montrent que le poids frais des parties aériennes est plus importante que celle des racines de *Vicia faba* L.

La production de la matière fraîche aérienne et racinaire de la plante diminue inversement proportionnel avec l'augmentation des doses de Cu-NaCl appliquées à la plante par rapport au témoin.

On note une diminution beaucoup plus importante à la dose de 200 meq/l de NaCl combinée avec 100,300 et 500 ppm de Cuivre.

L'analyse de la variance révèle un effet très hautement significatif pour les deux facteurs « NaCl » et « CuSO₄ » ainsi que pour l'interaction des deux facteurs (F1x2) sur le poids frais des parties aérienne et racinaire de la fève.

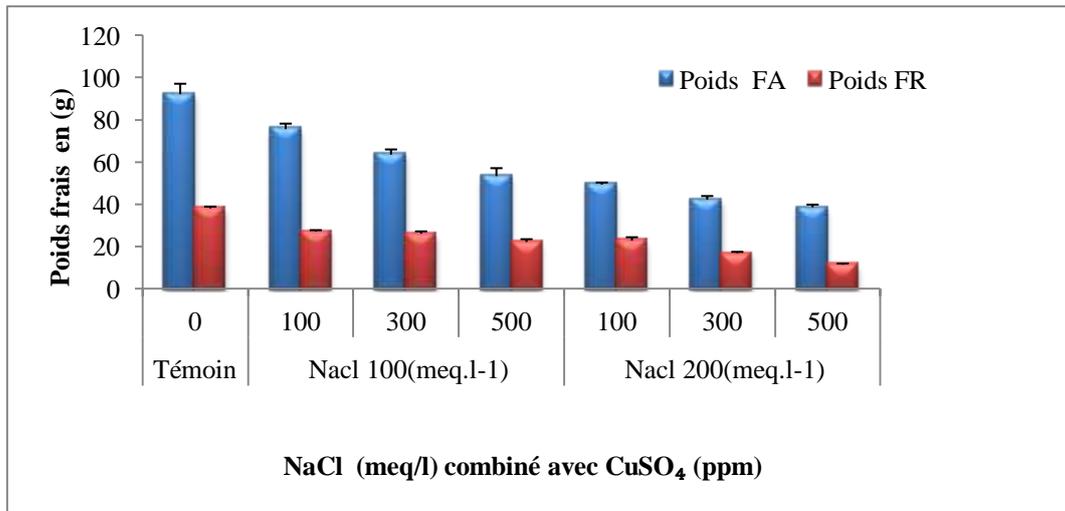


Figure 34- Poids frais moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre.

Tableau 25: Poids frais moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl-Cuivre ± l'écart type.

NaCl (meq/l)	CuSO ₄ (ppm)	Partie aérienne	Partie racinaire
0	0	92,3±4,943	38,1±0,823
100 meq.l ⁻¹	100	75,695±2,617	27,345±0,481
	300	63,61±2,47	26,128±1,121
	500	53,408±3,799	22,22±1,318
200 meq.l ⁻¹	100	49,402±0,985	22,895±1,581
	300	42,333±1,658	16,998±0,545
	500	38,646±1,281	11,405±0,614

b. Effet combiné NaCl+ZnSO₄

Les résultats obtenus révèlent que le poids frais des parties aérienne et racinaire de la plante diminue inversement proportionnel avec l'application des doses de Zn-NaCl par rapport au témoin (Figure 35). Cette diminution est moins importante à la dose de 100 meq/l de NaCl combinée avec 300,500 et 700 ppm de Zinc comparativement à la dose de 200 meq/l.

Le poids frais des plantes stressés le plus bas est obtenu à la dose de 700 ppm de Zn combinée avec 200 meq/l de NaCl (40.14 et 12.40 g) comparativement au témoin (92.3 et 38.1 g) et aux autres doses respectivement (partie aérienne et racinaire), (Tableau 26).

L'analyse statistique montre un effet très hautement significatif pour les deux facteurs « NaCl » et « ZnSO₄ » ainsi que pour l'interaction des deux facteurs (F1xF2) sur le poids frais de la partie aérienne et racinaire de la fève.

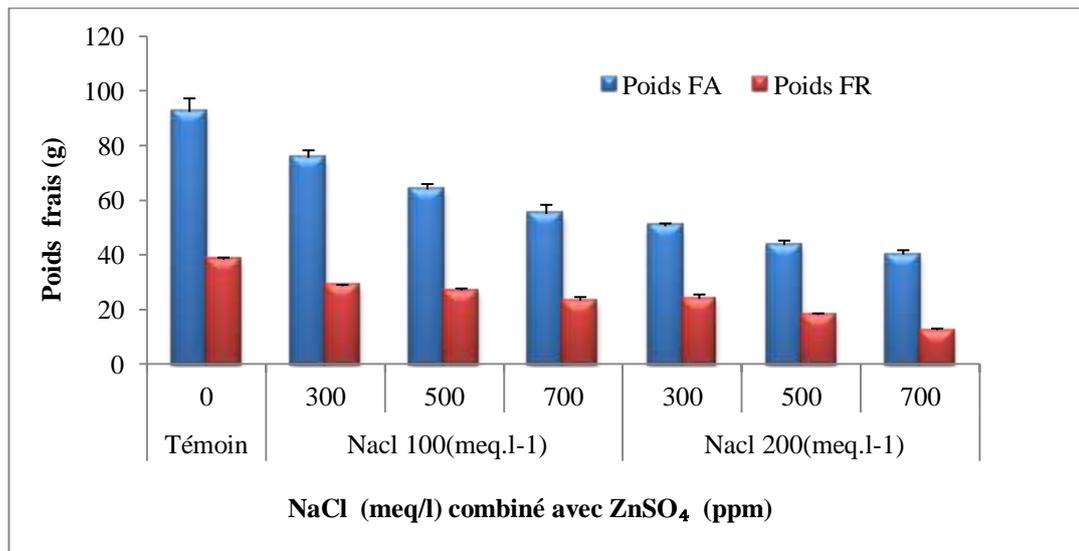


Figure 35- Poids frais moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc.

Tableau 26: Poids frais moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc ± l'écart type.

NaCl (meq.l ⁻¹)	ZnSO ₄ (ppm)	Partie aérienne	Partie racinaire
0	0	92,3±4,943	38,1±0,823
100	300	75,445±2,769	28,495±0,563
	500	63,885±1,974	26,878±0,791
	700	54,908±3,365	23,22±1,318

200	300	50,427±1,021	23,895±1,581
	500	43,583±1,599	17,998±0,545
	700	40,146±1,521	12,405±0,614

1.5. Poids sec de *Vicia faba* L.

1.5.1. Effet de NaCl sur le poids sec

Les résultats obtenus (Figure.36) indiquent que le poids sec des parties aérienne et racinaire de la fève diminue inversement proportionnel avec l'application du stress salin (100 et 200 meq/l). La matière sèche aérienne est plus importante que la matière sèche racinaire de la plante (Tableau.27).

La diminution du poids sec est plus importante pour le traitement 200meq/l du NaCl comparativement à la dose de 100 meq /l, cette diminution est de l'ordre de 17.79 et 21.74 % respectivement (partie aérienne, racinaire).

L'analyse statistique montre un effet très hautement significatif du NaCl sur le poids sec des parties aériennes et racinaires chez la fève.

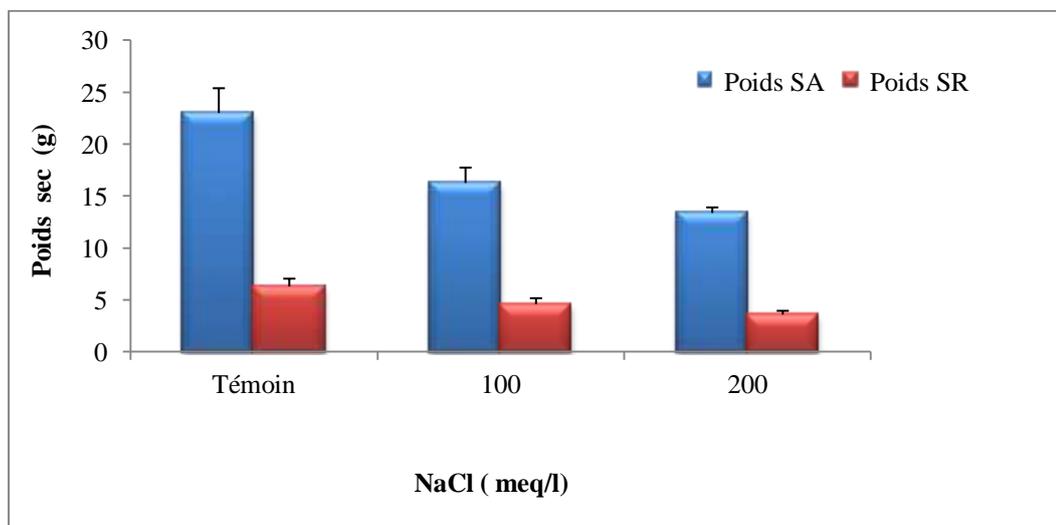


Figure 36- Poids sec moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl.

Tableau 27 - Poids sec moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl± l'écart type.

NaCl (meq/l)	Partie aérienne	Partie racinaire
0	22,9±2,388	6,3±0,753
100	16,3±1,482	4,6±0,578
200	13,4±0,538	3,6±0,365

1.5.2. Effet de Cuivre sur le poids sec

Les résultats trouvés révèlent que le poids sec de *Vicia faba* L. diminue inversement proportionnel avec les doses appliquées du Cuivre (Figure 37).

Les régressions du poids sec de la partie aérienne sont de l'ordre de 40.27 % à la dose de 500 ppm de cuivre, alors qu'elles ne sont que de 14.30 % à la dose 100 ppm par rapport au témoin .En revanche, La partie racinaire enregistre également une diminution assez importante du poids sec de l'ordre de 65.08 % (500 ppm), et 36.03 % (100 ppm) de cuivre par rapport au témoin (Tableau.28).

Le poids sec présente une teneur optimale en poids frais à la dose de 300 ppm de Cuivre chez les deux parties aériennes et racinaires.

L'analyse statistique montre un effet très hautement significatif du Cuivre sur le poids sec des parties aériennes et racinaires chez la fève.

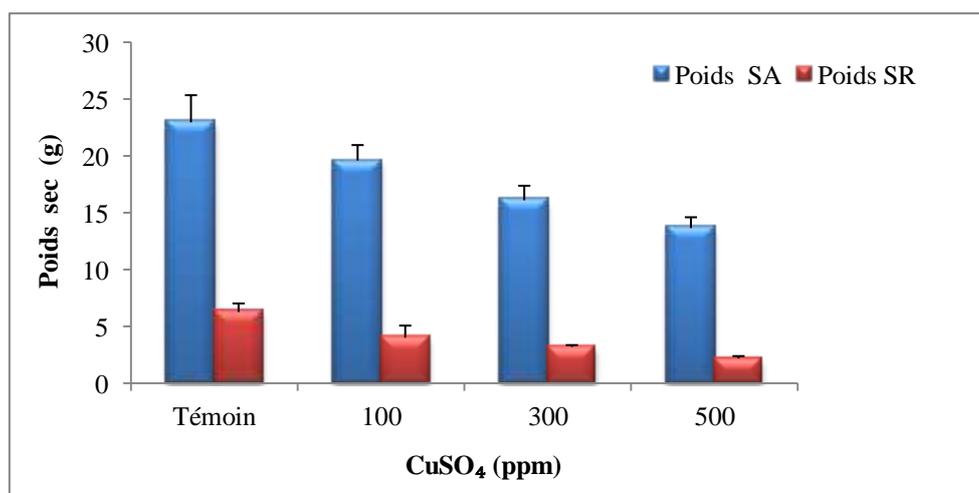


Figure 37- Poids sec moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre.

Tableau 28 - Poids sec moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre± l'écart type.

CuSO ₄ (ppm)	Partie aérienne	Partie racinaire
0	22,9±2,388	6,3±0,753
100	19,625±1,359	4,03±1,066
300	16,123±1,28	3,212±0,162
500	13,678±0,954	2,2±0,211

1.5.3. Effet de Zinc sur le poids sec

Le Zinc induit une diminution (inversement proportionnel) du poids sec des parties aérienne et racinaire des plantes stressés comparativement au témoin (Figure .38).le poids sec est plus important dans la partie aérienne par rapport à la partie racinaire de la plante.

Le poids sec de la plante stressée au Zinc varie de 21.87 g pour la dose de 300 ppm de Zinc à 13.40 g pour la dose de 700 ppm, par ailleurs le poids sec obtenu pour la partie racinaire varie de 5.78 g pour la dose de 300 ppm de Zinc à 2.77 g pour la dose de 700 ppm (Tableau. 29).

Le poids sec présente une teneur optimale en poids frais à la dose de 300 ppm de zinc chez les deux parties aériennes et racinaires

L'analyse statistique montre un effet très hautement significatif du Zinc sur le poids sec des parties aériennes et racinaires chez la fève.

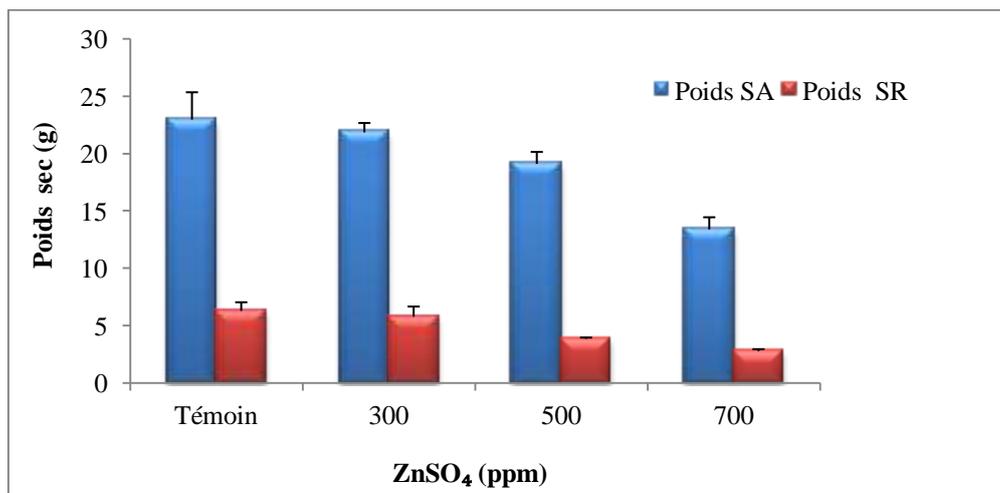


Figure 38- Poids sec moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc.

Tableau 29- Poids sec moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc± l'écart type.

ZnSO₄ (ppm)	Partie aérienne	Partie racinaire
0	22,9±2,388	6,3±0,753
300	21,875±0,817	5,78±0,89
500	19,123±1,048	3,863±0,096
700	13,403±1,061	2,775±0,17

1.5.4. Effet combiné (NaCl +CuSO₄) sur le poids sec chez *Vicia faba* L.

a. Effet combiné NaCl+CuSO₄

Le poids sec de la partie aérienne et racinaire diminue inversement proportionnel avec l'application des doses de Cu-NaCl comparativement au témoin (Figure.39), la matière sèche des parties aériennes de *Vicia faba* L.est largement supérieure à celle des parties racinaires.

Les plantes stressée avec 100 meq.l⁻¹ de NaCl présente des poids sec (aériennes et racinaire) nettement supérieures à celle menée avec 200 meq.l⁻¹ de NaCl.

La production de la matière sèche la plus élevée de la partie aérienne et racinaire est enregistrée à la dose de 100 ppm de Cu combinée avec 100 meq/l de NaCl (18.44 et 3.70 g), sachant que le plus faible poids est enregistré à la dose de 500 ppm de Cu combinée avec 200 meq/l de NaCl (9.83 et 1.12 g) respectivement (partie aérienne et racinaire), (tableau .30).

L'analyse de la variance montre que l'effet de Cu, NaCl et l'interaction Cu-NaCl est très hautement significatif sur le poids sec des parties aérienne et racinaire de la fève.

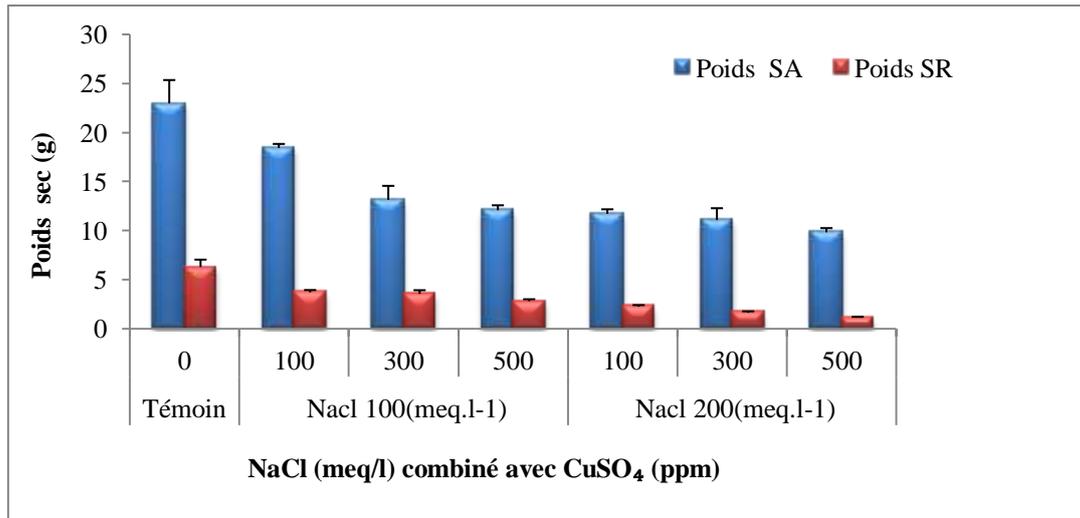


Figure 39- Poids sec moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre.

Tableau 30: Poids sec moyen des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre ± l'écart type.

NaCl (meq/l)	CuSO ₄ (ppm)	Partie aérienne	Partie racinaire
0	0	22,9±2,388	6,3±0,753
100	100	18,448±0,408	3,703±0,234
	300	13,135±1,438	3,537±0,385
	500	12,083±0,509	2,805±0,192
200	100	11,725±0,455	2,235±0,165
	300	11,083±1,209	1,618±0,146
	500	9,833±0,428	1,123±0,075

b. Effet combiné NaCl+ZnSO₄

Les résultats obtenus montrent que la production de la matière sèche aérienne est plus importante que la production de la matière sèche racinaire de la fève (Figure.40).

La production de la matière sèche aérienne et racinaire de la plante diminue inversement proportionnelle avec l'augmentation des doses de Zn-NaCl appliquées à la plante par rapport au témoin. Cette diminution est beaucoup plus importante à la dose de 200 meq/l de NaCl combinée avec 300,500 et 700 ppm de Zinc (Tableau 31).

L'analyse de la variance révèle un effet très hautement significatif pour les deux facteurs « NaCl » et « ZnSO₄ » ainsi que pour l'interaction des deux facteurs (F1x F2) sur le poids sec de la partie aérienne et racinaire de la fève.

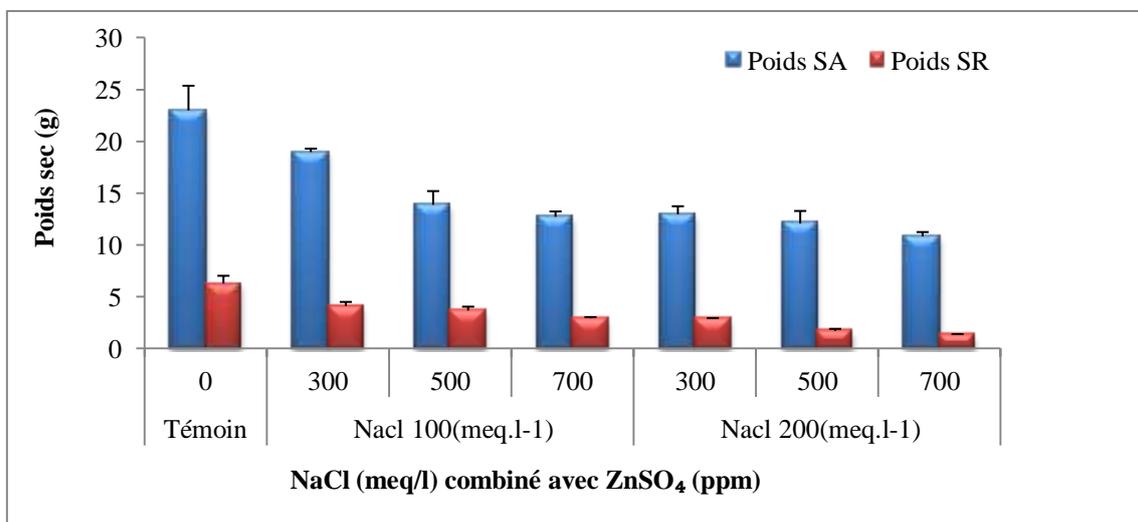


Figure 40- Poids moyen sec des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc.

Tableau 31: Poids moyen sec des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc ± l'écart type.

NaCl (meq/l)	ZnSO ₄ (ppm)	Partie aérienne	Partie racinaire
0	0	22,9±2,388	6,3±0,753
100	300	18,982±0,326	4,128±0,39
	500	13,885±1,324	3,685±0,377
	700	12,733±0,516	2,93±0,122
200	300	12,975±0,775	2,885±0,073
	500	12,083±1,209	1,718±0,197
	700	10,833±0,428	1,348±0,062

2. Paramètres biochimiques

2.1. Teneur en chlorophylle

2.1.1. Effet de NaCl sur la teneur en chlorophylle a, b et totale des feuilles de *Vicia faba* L.

Les résultats obtenus montrent que les teneurs en chlorophylles **a**, **b** et **totale** des feuilles du *Vicia faba* L. diminuent inversement proportionnelle avec l'application du stress

salin (100 et 200 meq/l). La chlorophylle **a** et **totale** chez les feuilles de la plante est largement supérieure à celle de la chlorophylle **b** (Figure.41).les teneurs en chlorophylles a et b sont les plus importantes à la dose de 100 meq/l de NaCl.

On note également que les valeurs les plus basses ont été enregistrées chez les plantes traitées avec 200 meq/l de NaCl (Tableau.32).

La teneur en chlorophylle **a** enregistrée chez les plantes stressées au NaCl avec 100 meq/l est de (755.399 mg/ g MF), et 200 meq/l (429.275 mg/ g MF), cette teneur est inférieure à celle obtenue pour les plantes témoins (1094.328 mg/g MF).

Chez les plantes traitées à 100 et 200 meq/l de NaCl, la teneur en chlorophylle **b** est moins importante par rapport à celle enregistrée chez les plantes témoins. Les valeurs enregistrées sont 281.056 ,127.826 et 81.093 mg/g MF respectivement avec les doses 0, 100 et 200meq/l de NaCl.

Les doses de 100 et 200 meq/l de NaCl provoquent une diminution de la teneur en chlorophylle totale (883,226 et 510,369 mg/g MF) respectivement comparativement au témoin (1375,384 mg/g MF).

L'analyse statistique montre que l'effet de NaCl est très hautement significatif sur la teneur en chlorophylle a, b et totale dans les feuilles de *Vicia faba* L.

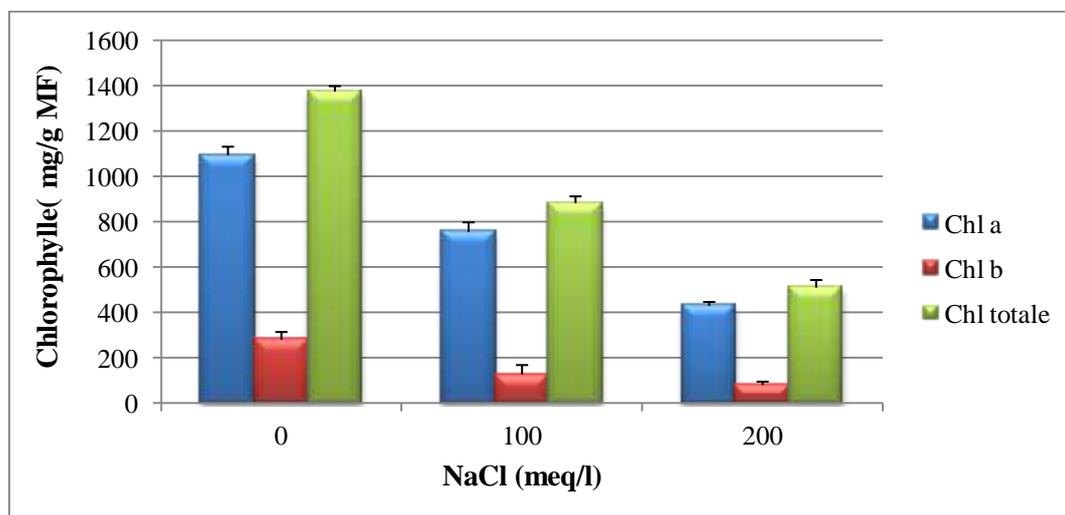


Figure 41- Teneur en chlorophylle a, b et totale (mg/g MF) de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl.

Tableau 32 - Teneur en chlorophylle a, b et totale (mg/g MF) de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl± l'écart type.

NaCl (meq/l)	<i>Chlr (a)</i>	<i>Chlr (b)</i>	<i>Chlr totale</i>
0	1094,328±38,19	281,056±34,041	1375,384±24,396
100	755,399±43,297	127,826±41,288	883,226±30,135
200	429,275±18,311	81,093±14,851	510,369±33,9

2.1.2. Effet de Cuivre sur la teneur en chlorophylle a, b et totale des feuilles de *Vicia faba* L.

Les teneurs en chlorophylles de la fève diminuent inversement proportionnelle sous l'effet de Cuivre par rapport au témoin. La teneur en chlorophylle **b** est largement inférieur à celle de la chlorophylle **a** et **totale**, les teneurs en chlorophylles a et b sont les plus importantes à la dose de 100 meq/l de NaCl (Figure.42).

L'application de Cuivre aux doses 100, 300 et 500 ppm entraine une diminution de la teneur en chlorophylle **a** (767.534, 451.5 et 266.193 mg/g MF) successivement, par rapport à la plante témoin (1094.328 mg/g MF).

La dose de 500 ppm de cuivre provoque une diminution très importante de la teneur en chlorophylle **b** (52,672 mg/g MF) comparativement au témoin (281.056 mg/g MF) et aux autres doses appliquées de cuivre.

Les teneurs en chlorophylle totale de la plante stressée au cuivre est inférieur à celle du témoin (1375.384 mg/g MF) varient de 948.12 mg/g MF pour la dose de 100 ppm de Cu à 318.865 mg/g MF pour la dose de 500 ppm de Cu (Tableau. 33).

L'analyse de la variance révèle une différence très hautement significative du Cuivre sur la chlorophylle **a, b et totale** chez les plantes stressées par rapport aux feuilles des plantes témoins.

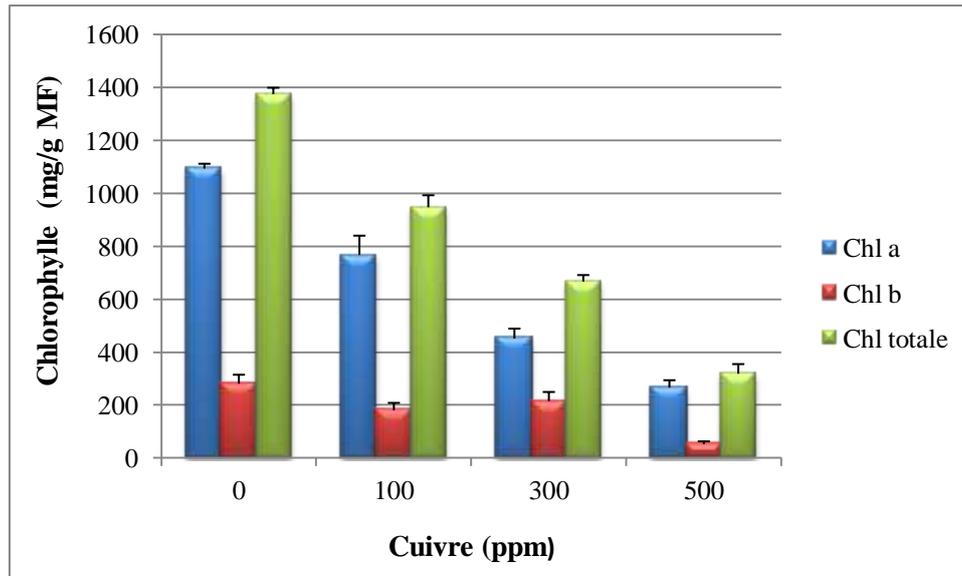


Figure 42- Teneur en chlorophylle a, b et totale (mg/g MF) de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre.

Tableau 33 - Teneur en chlorophylle a, b et totale (mg/g MF) de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre ± l'écart type.

CuSO₄ (ppm)	Chl (a)	Chl (b)	Chl totale
0	1094,328±18,19	281,056±34,041	1375,384±13,883
100	767,534±73,19	180,585±27,991	948,12±13,552
300	451,5±37,966	215,639±34,252	667,139±12,036
500	266,193±28,109	52,672±10,566	318,865±6,713

2.1.3. Effet de Zinc sur la teneur en chlorophylle a, b et totale des feuilles de *Vicia faba* L.

Les résultats obtenus (Figure.43) montrent que les teneurs en chlorophylles **a**, **b** et **totale** des feuilles du *Vicia faba* .L. diminuent inversement proportionnelle avec l'application de stress en Zn (300 ,500 et 700 ppm). La chlorophylle **a** et **totale** chez les feuilles de la plante est largement supérieure à celle de la chlorophylle **b** (Tableau.34).

Les teneurs en chlorophylles **a** et **b** sont les plus importantes à la dose de 300 ppm de zinc.

L'analyse statistique montre que l'effet de Zinc est très hautement significatif sur la teneur en chlorophylle **a**, **b** et **totale** dans les feuilles de *Vicia faba* L.

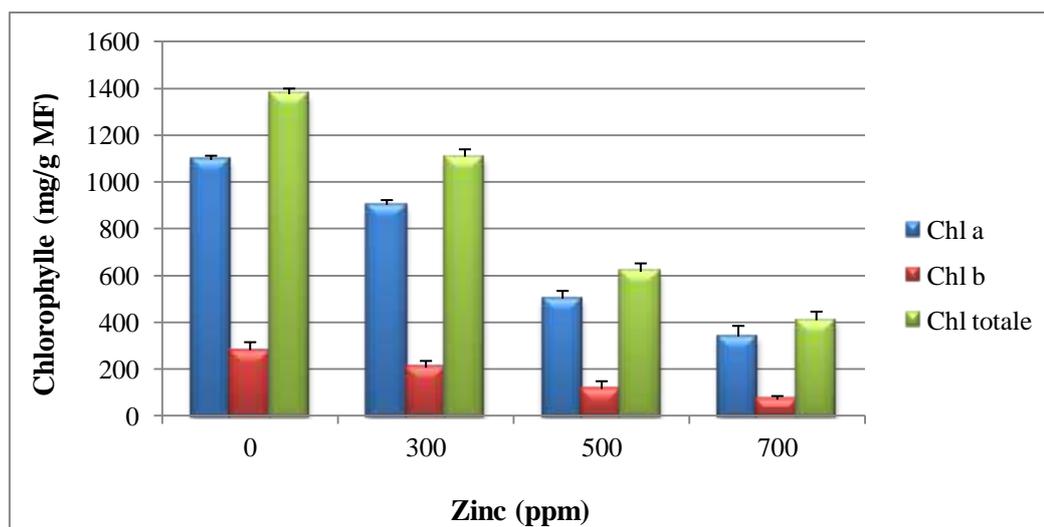


Figure 43- Teneur en chlorophylle a, b et totale (mg/g MF) de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc.

Tableau 34 - Teneur en chlorophylle a, b et totale (mg/g MF) de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc ± l'écart type.

ZnSO ₄ (ppm)	Chl (a)	Chl (b)	Chl totale
0	1094,328±18,19	281,056±34,041	1375,384±13,883
300	902,484±20,356	206,058±28,924	1108,542±31,402
500	500,766±33,725	115,125±33,023	615,89±36,288
700	339,271±45,568	69,431±15,385	408,702±36,97

2.1.4. Effet combiné (salin et métallique) sur la teneur en chlorophylle a, b et totale des feuilles de *Vicia faba* L.

a. Effet combiné NaCl+CuSO₄

Les teneurs en chlorophylles de la fève diminuent inversement proportionnelle sous l'effet de l'interaction Cu-NaCl par rapport au témoin, Ces teneurs en chlorophylles sont inférieures à celle enregistrée chez le témoin (Figure.44).

La teneur en chlorophylle **b** est largement inférieur à celle de la chlorophylle **a** et **totale**, les teneurs en chlorophylles **a** et **b** sont les plus importantes à la dose de 100 ppm de cuivre combiné avec 100 meq/l de NaCl (Tableau.35).

On note que l'interaction Cu-NaCl induit une diminution beaucoup plus importante des teneurs en chlorophylle chez les plantes stressée avec 200 meq.l⁻¹ de NaCl.

L'analyse statistique montre que l'effet de l'interaction Cu-NaCl sur le taux de chlorophylle **a**, **b** et **totale** est très hautement significatif.

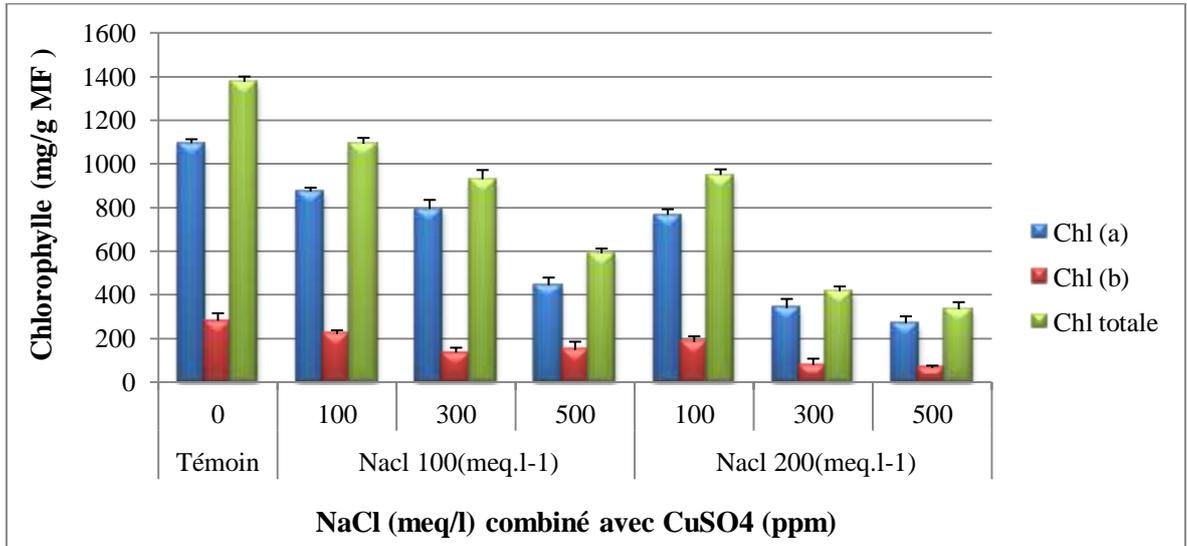


Figure 44- Teneur en chlorophylle a, b et totale (mg/g MF) de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre.

Tableau 35 - Teneur en chlorophylle a, b et totale (mg/g MF) de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre \pm l'écart type.

NaCl (meq/l)	CuSO ₄ (ppm)	<i>Chlr (a)</i>	<i>Chlr (b)</i>	<i>Chlr totale</i>
0	0	1094,328 \pm 18,19	281,056 \pm 34,041	1375,384 \pm 13,883
100 (meq/l)	100	872,804 \pm 17,746	218,918 \pm 17,915	1091,722 \pm 27,397
	300	793,288 \pm 41,227	135,304 \pm 21,892	928,591 \pm 42,836
	500	442,809 \pm 35,823	147,034 \pm 37,611	589,843 \pm 21,847
200 (meq/l)	100	766,118 \pm 25,863	182,599 \pm 26,657	948,718 \pm 25,934
	300	338,251 \pm 42,509	77,555 \pm 29,388	415,806 \pm 22,121
	500	269,129 \pm 31,887	64,032 \pm 11,008	333,162 \pm 32,768

b. Effet combiné NaCl+ZnSO₄

L'interaction de Zn avec 100 et 200 meq/l de NaCl induit une diminution (inversement proportionnelle) de la teneur en chlorophylles **a**, **b** et **totale** dans les feuilles de la plante par rapport au témoin (Figure.45). La chlorophylle **a** et **totale** chez les feuilles de la plante est largement supérieure à celle de la chlorophylle **b**.

Les teneurs en chlorophylles **a** et **b** sont les plus importantes à la dose de 300 ppm de Zinc combiné avec 100 meq/l de NaCl.

Les plantes stressées avec 100 meq.l⁻¹ de NaCl présente des teneurs en chlorophylle nettement supérieures à celle menée avec 200 meq.l⁻¹ de NaCl (Tableau.36).

L'analyse de la variance révèle un effet très hautement significatif du traitement Zn-NaCl sur les teneurs en chlorophylle **a**, **b** et **totale** de la plante.

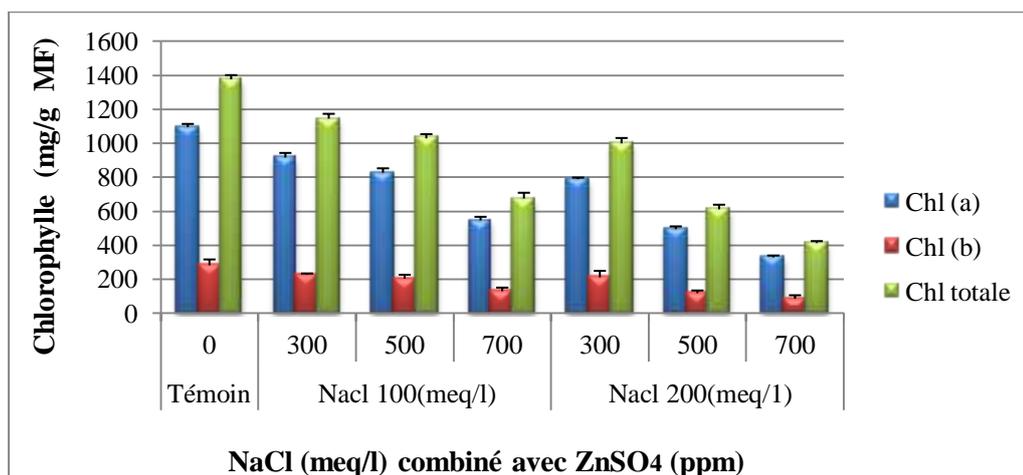


Figure 45- Teneur en chlorophylle a, b et totale (mg/g MF) de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc.

Tableau 36 - Teneur en chlorophylle a, b et totale (mg/g MF) de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc ± l'écart type.

NaCl (meq/l)	ZnSO ₄ (ppm)	Chlr (a)	Chlr (b)	Chlr totale
0	0	1094,328±18,19	281,056±34,041	1375,384±13,883
100 (meq/l)	300	915,235±26,723	228,432±4,054	1143,667±28,337
	500	825,644±25,7	201,897±23,214	1027,541±24,674
	700	545,718±20,433	127,727±21,796	673,444±7,324
200 (meq/l)	300	788,44±8,567	209,817±38,238	998,257±31,534
	500	493,301±16,403	116,67±15,94	609,971±27,24
	700	327,704±10,467	83,952±20,611	411,657±11,419

2.2. Teneur en proline

2.2.1. Effet de NaCl sur la teneur en proline des feuilles et racines de *Vicia faba* L.

Les résultats obtenus révèlent une augmentation importante (proportionnelle) de la proline dans les deux parties aérienne et racinaire de la fève sous l'effet de NaCl, ces teneurs sont plus élevées comparativement au témoin (Figure.46). L'accumulation de la proline est plus importante dans les feuilles par rapport aux racines de *Vicia faba* L.

La teneur la plus importante en proline dans les parties aériennes et racinaires est enregistrée à la dose de 200 meq/l de NaCl (146.244 et 109.987mg/g MS respectivement), (Tableau 37).

L'analyse de la variance montre que le NaCl a un effet très hautement significatif sur l'accumulation de la proline dans les deux parties ; aérienne et racinaire de la plante du *Vicia faba* L.

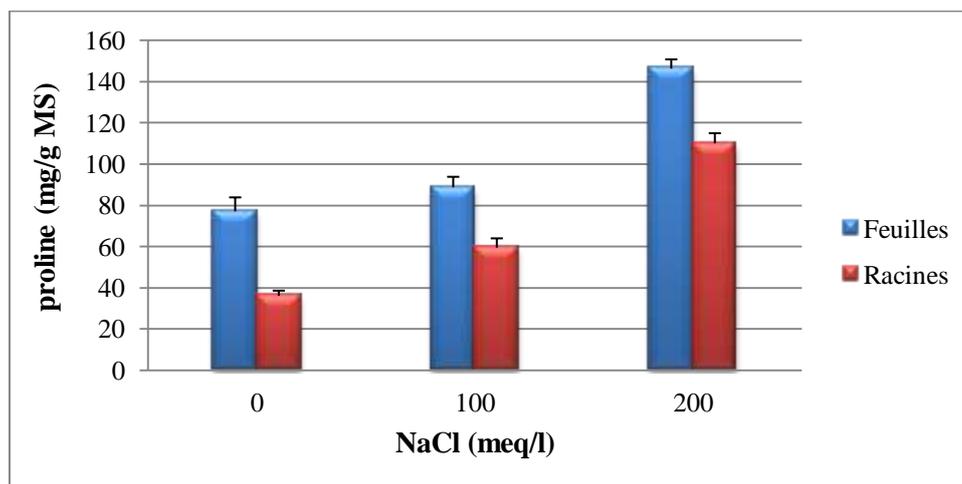


Figure 46- Teneur en proline (mg/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl.

Tableau 37 - Teneur en proline (mg/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl ± l'écart type.

NaCl (meq/l)	Feuilles	Racines
0	76,992±6,775	36,048±2,453
100	88,622±5,133	59,386±4,494
200	146,244±4,49	109,987±4,916

2.2.2. Effet de Cuivre sur la teneur en proline des feuilles et racines de *Vicia faba* L.

La teneur en proline dans les feuilles et racines chez la fève augmente proportionnellement avec les doses du Cuivre appliquées à la plante (Figure.47).

On enregistre chez les plantes stressées au Cuivre, des teneurs plus élevées de la proline dans les feuilles comparativement aux racines (Tableau 38).

La teneur la plus élevée en proline est enregistré à la dose de 500 ppm de Cuivre (177.688 et 94.281 mg/g MS). Par contre, le plus faible taux en proline est enregistré chez le témoin (76,992 et 36,048 mg/g MS) dans les parties aérienne et racinaire respectivement.

L'analyse statistique montre que l'accumulation de la proline sous l'effet du Cuivre est très hautement significative dans les deux parties ; aérienne et racinaire de la plante du *Vicia faba* L.

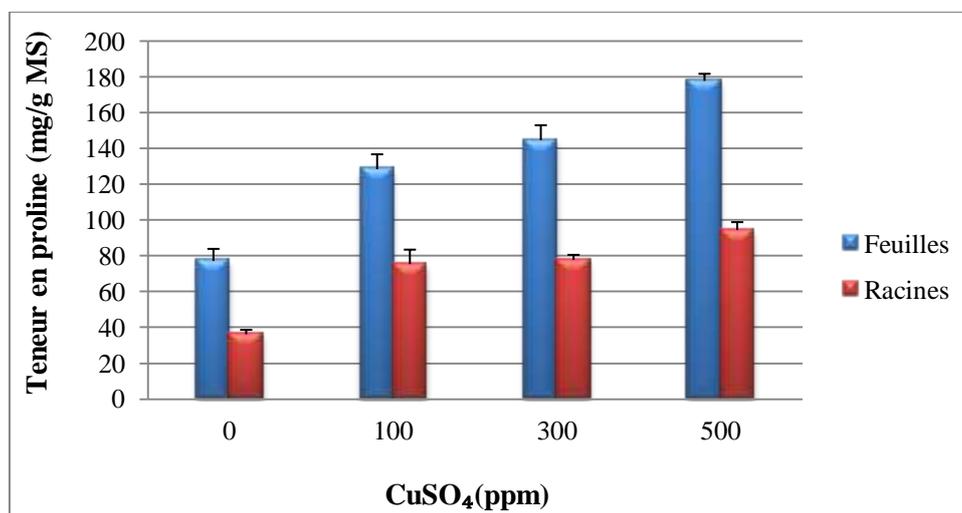


Figure 47- Teneur en proline (mg/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre.

Tableau 38- Teneur en proline (mg/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre ± l'écart type.

CuSO ₄ (ppm)	Feuilles	Racines
0	76,992±6,775	36,048±2,453
100	128,29±8,349	75,218±8,111
300	144,511±8,39	77,553±2,863
500	177,688±3,951	94,281±4,429

2.2.3. Effet de Zinc sur la teneur en proline des feuilles et racines de *Vicia faba* L.

Les résultats obtenus (Figure.48) révèlent que la teneur en proline du *Vicia faba*.L augmente proportionnellement avec les doses du Zinc appliquées à la plante, dont la teneur la plus basse de la proline est enregistrée en absence du Zinc dans les feuilles (76.992 mg/g MS) et dans les racines (36.048 mg/g MS).en revanche, ces teneurs sont plus importantes à la dose de 700 ppm de Zinc (182.977 et 97.574 mg/g MS) dans les parties aérienne et racinaire (respectivement) comparativement au témoin et autres doses métallique appliquées (300 et 500 ppm) ,(Tableau 39).

La teneur en proline est plus importante dans les feuilles comparativement aux racines de la plante.

L'analyse de la variance montre que le Zinc a un effet très hautement significatif sur l'accumulation de la proline dans les deux parties ; aérienne et racinaire de la plante du *Vicia faba* L.

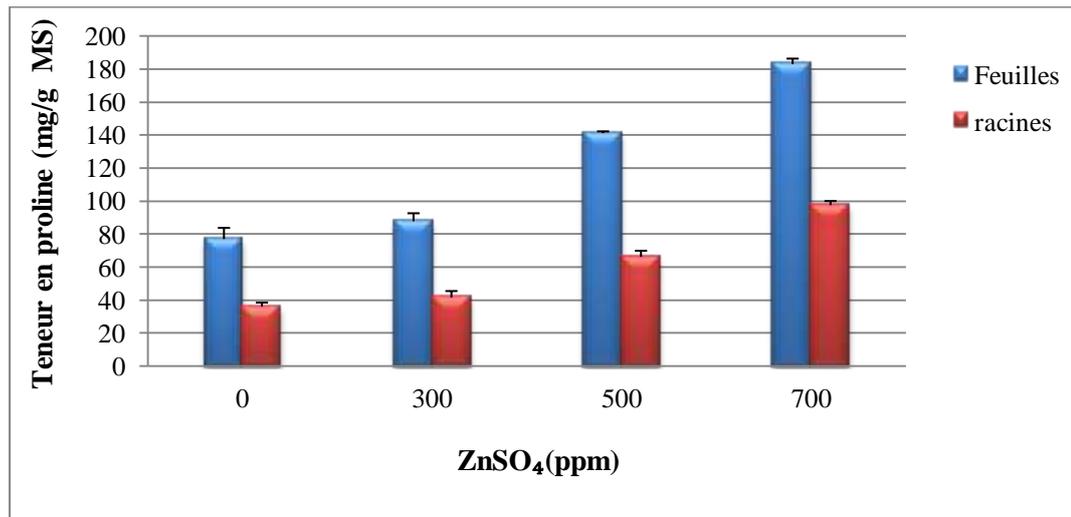


Figure 48- Teneur en proline (mg/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc.

Tableau 39 - Teneur en proline (mg/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc ± l'écart type.

ZnSO ₄ (ppm)	Feuilles	Racines
0	76,992±6,775	36,048±2,453
300	87,758±4,863	41,526±3,922
500	141,21±1,051	66,194±3,685
700	182,977±3,406	97,574±2,459

2.2.4. Effet combiné (salin et métallique) sur la teneur en proline des feuilles et racines de *Vicia faba* L.

a. Effet combiné NaCl+CuSO₄

Le taux de la proline dans les feuilles et racines de la fève augmente proportionnellement avec les doses de l'interaction Cu-NaCl appliquées à la plante. On note également que la teneur en proline est moins importante dans les racines par rapport aux feuilles (Figure.49).

On observe également que l'interaction Cu-NaCl induit une accumulation beaucoup plus importante en proline chez les plantes stressée avec 200 meq/l de NaCl.

Les teneurs les plus élevées en proline sont enregistrées à la dose de 500 ppm de Cu combinée avec 100 meq/l de NaCl (164,959 et 74,87mg/g MS), et 500 ppm de Cu combinée avec 200 meq/l de NaCl (239.975 et 114.864 mg/g MS). Par contre, le plus faible taux en proline est enregistré à la dose de 100 ppm de Cu combinée avec 100 meq/l de NaCl (65,402 et 27,245 mg/g MS) dans les parties aérienne et racinaire respectivement (Tableau.40)

L'analyse de la variance montre que l'effet de l'interaction Cu-NaCl est très hautement significatif sur les teneurs en proline de *Vicia faba* L.

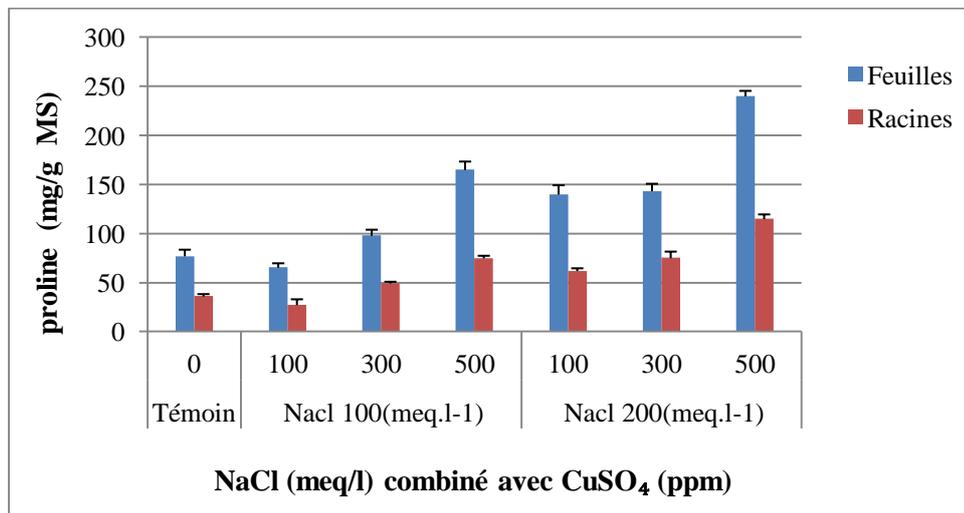


Figure 49- Teneur en proline (mg/g Ms) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre.

Tableau 40 - Teneur en proline (mg/g Ms) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre \pm l'écart type.

NaCl (meq/l)	CuSO ₄ (ppm)	Feuilles	Racines
0	0	76,992 \pm 6,775	36,048 \pm 2,453
100 (meq/l)	100	65,402 \pm 4,504	27,245 \pm 5,972
	300	97,891 \pm 6,236	49,221 \pm 1,854
	500	164,959 \pm 8,638	74,87 \pm 2,707
200 (meq/l)	100	139,88 \pm 9,547	61,951 \pm 2,855
	300	143,363 \pm 7,593	75,092 \pm 6,715
	500	239,975 \pm 5,614	114,864 \pm 4,842

b. Effet combiné NaCl+ZnSO₄

Sous l'interaction Zn-NaCl, la teneur en proline augmente proportionnellement dans les parties aérienne et racinaire de la plante (Figure.50).

Les résultats obtenus (Tableau.41) montrent que les teneurs les plus élevées en proline sont enregistrées à la dose de 700 ppm de Zn combinée avec 100meq/l de NaCl (151.659 et 78.797 mg/g MS) et 700 ppm de Zn combinée avec 200 meq/l de NaCl (168.727 et 99.031 mg/g MS). En revanche, la plus faible teneur en proline est marquée à la dose de 100 ppm de Zn combinée avec 100 meq/l (57,169 et 29,493 mg/g MS) dans les parties aérienne et racinaire (respectivement).

L'analyse de la variance montre que l'effet de l'interaction Zn-NaCl est très hautement significatif sur les teneurs en proline de *Vicia faba* L.

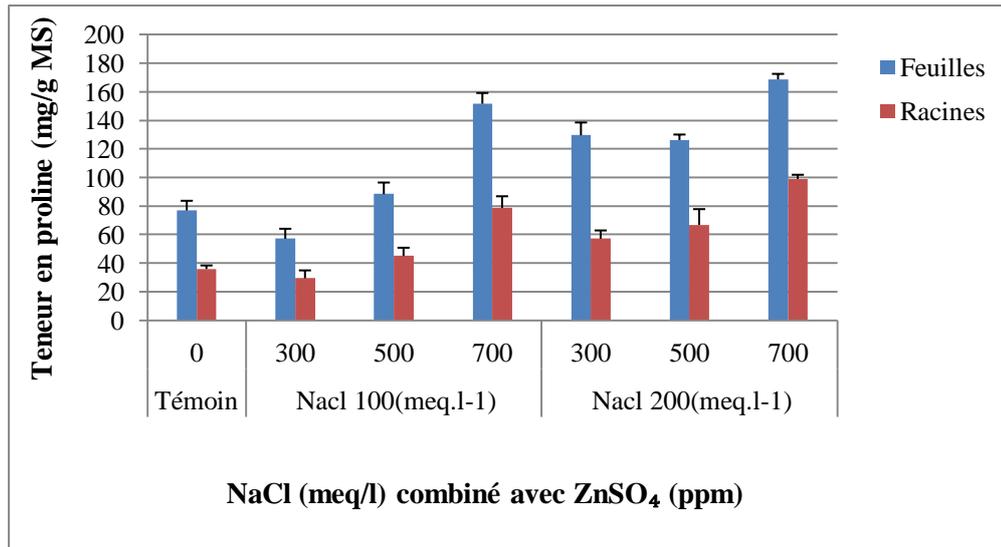


Figure 50- Teneur en proline (mg/g Ms) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc.

Tableau 41 - Teneur en proline (mg/g Ms) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc ± l'écart type.

NaCl (meq/l)	ZnSO ₄ (ppm)	Feuilles	Racines
0	0	76,992±6,775	36,048±2,453
100 (meq/l)	300	57,169±7,008	29,493±5,538
	500	88,391±8,151	45,104±5,78
	700	151,659±7,565	78,797±8,135
200 (meq/l)	300	129,62±8,97	57,201±5,804
	500	126,263±3,877	66,922±11,005
	700	168,727±3,896	99,031±2,957

2.3.Teneur en sucres solubles

2.3.1. Effet de NaCl sur la teneur en sucres solubles des feuilles et racines de *Vicia faba* L.

Les résultats obtenus montrent une augmentation proportionnelle de la teneur en sucres solubles dans les deux parties ; aérienne et racinaire des plantes stressées aux NaCl par rapport à la plante témoin (Figure.51). Les teneurs en sucres solubles dans la partie aérienne est supérieure à celle de la partie racinaire des plantes du *Vicia faba* L. en présence et en absence du NaCl.

Les teneurs obtenues en sucres de la partie aérienne et racinaire des plantes traitées à 100 meq/l de NaCl augmentent légèrement à (44.889 et 25.822 mg/g MS) comparativement à celles des plantes témoins (42.424 et 21.821 mg/g MS). tandis que L'enrichissement des solutions à 200meq/l de NaCl provoque une accumulation très importante en sucres solubles (56,842 et 30,562 mg/g MS) dans les parties aérienne et racinaire (respectivement) (Tableau.42).

L'analyse de la variance révèle que le NaCl a un effet très hautement significatif sur la teneur en sucres solubles accumulées dans les feuilles et racines de la fève.

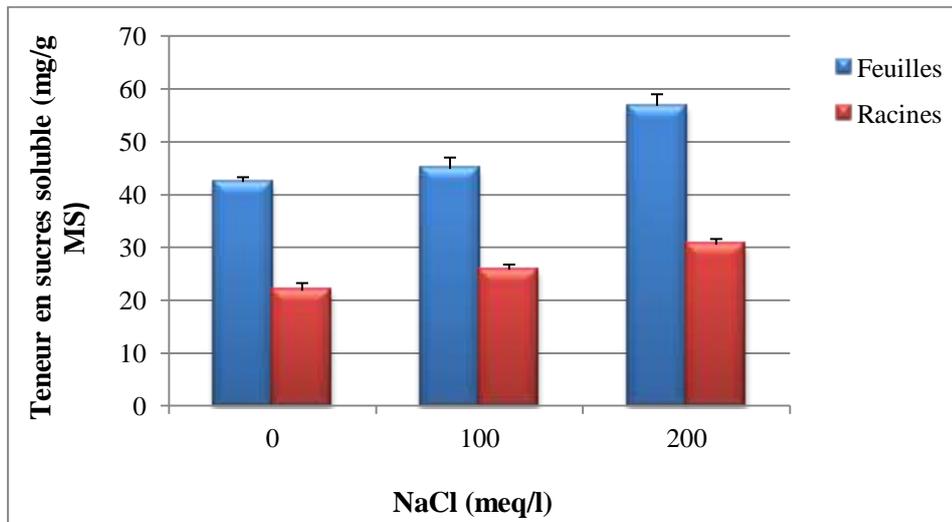


Figure 51- Teneur en sucres solubles (mg/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl.

Tableau 42 - Teneur en sucres solubles (mg/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl± l'écart type.

NaCl (meq/l)	Feuilles	racines
0	42,424±0,891	21,821±1,456
100	44,889±2,147	25,822±0,956
200	56,842±2,178	30,562±1,061

2.3.2. Effet de Cuivre sur la teneur en sucres solubles des feuilles et racines de *Vicia faba* L.

Les résultats obtenus de la figure 52 montrent que le taux des sucres solubles dans les parties aériennes et racinaires de *Vicia faba* L. augmente proportionnellement avec les doses

du cuivre appliquées à la plante. Les teneurs en sucres solubles dans la partie racinaire est inférieur à celle de partie aérienne des plantes.

On observe que la teneur la plus élevée en sucres solubles est enregistrée à la dose de 500 ppm de Cu (49.732 et 27.535 mg/g MS). En revanche, la plus faible teneur en sucres solubles est marquée à la dose de 100 ppm de Cu (39.09 et 20.712 mg/g MS) pour la partie aérienne et racinaire respectivement (Tableau.43).

L'analyse de la variance révèle que le Cuivre a un effet très hautement significatif sur la teneur en sucres solubles accumulées dans les feuilles et racines de la fève.

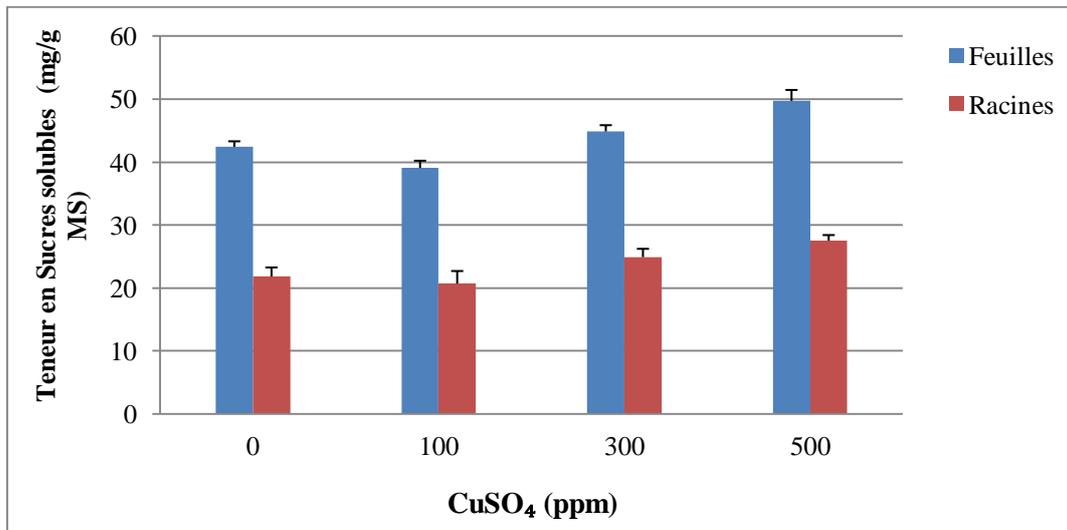


Figure 52- Teneur en sucres solubles (mg/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre.

Tableau 43 - Teneur en sucres solubles (mg/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre± l'écart type.

CuSO ₄ (ppm)	Feuilles	racines
0	42,424±0,891	21,821±1,456
100	39,09±1,138	20,712±1,994
300	44,881±0,995	24,91±1,324
500	49,732±1,738	27,535±0,885

2.3.3. Effet de Zinc sur la teneur en sucres solubles des feuilles et racines de *Vicia faba* L.

Les résultats obtenus (Figure.53), indiquent que l'application du Zinc induit une augmentation proportionnelle des teneurs en sucres solubles chez la fève. Ces teneurs sont plus importantes dans la partie aérienne comparativement à la partie racinaire.

L'évaluation de l'effet du Zinc sur la teneur en sucres solubles chez *Vicia faba* L. révèle que le taux des sucres augmente d'une façon importante au niveau des feuilles et des racines des plantes traitées avec 500 et 700 ppm de Zn par rapport aux témoins et plantes traitées avec 300 ppm du Zn (Tableau.44).

L'analyse de la variance révèle que le Zinc a un effet très hautement significatif sur la teneur en sucres solubles accumulées dans les feuilles et racines de la fève.

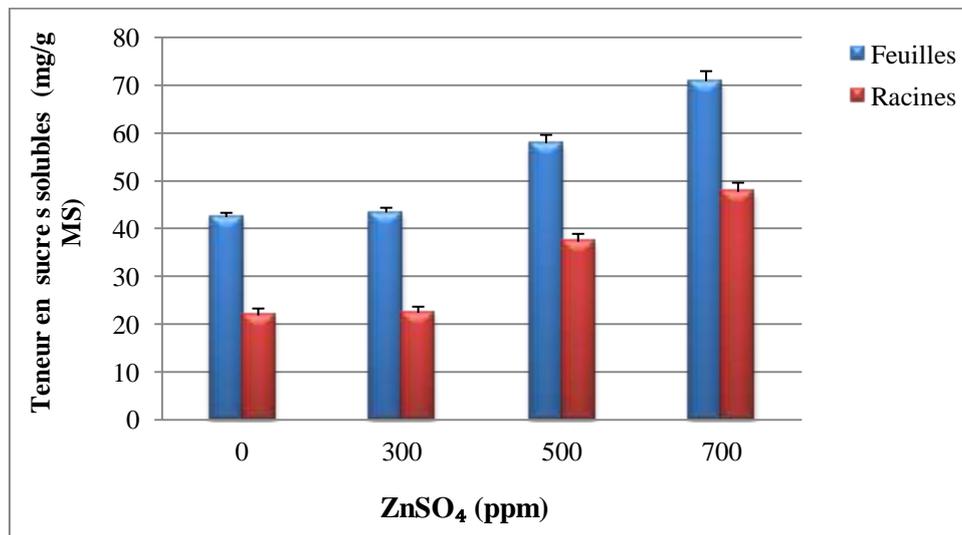


Figure 53- Teneur en sucres solubles (mg/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc.

Tableau 44 - Teneur en sucres solubles (mg/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc ± l'écart type.

ZnSO ₄ (ppm)	Feuilles	racine
0	42,424±0,891	21,821±1,456
300	43,372±1,007	22,39±1,268
500	57,872±1,767	37,262±1,647
700	70,859±2,127	47,703±1,915

2.3.4. Effet combiné (salin et métallique) sur la teneur en sucres solubles des feuilles et racines de *Vicia faba* L.

a. Effet combiné NaCl+CuSO₄

La teneur en sucres solubles sous l'interaction Cu-NaCl augmente proportionnellement dans les parties aérienne et racinaire de la plante (Figure.54). On note que l'interaction Cu-NaCl induit une accumulation beaucoup plus importante en sucres solubles chez les plantes stressée avec 200 meq/l de NaCl.

Les résultats obtenus (Tableau.45) montrent que les teneurs les plus élevées en sucres solubles sont enregistrées à la dose de 500 ppm de Cu combinée avec 100meq/l de NaCl (164.959 et 74.87 mg/g MS) et 500 ppm de Cu combinée avec 200 meq/l de NaCl (239.975 et 114.864 mg/g MS). En revanche, la plus faible teneur en sucres solubles est enregistrée au témoin (42.424 et 21.821 mg/g MS) dans les parties aérienne et racinaire respectivement.

L'analyse de la variance montre que l'effet de l'interaction Cu-NaCl est très hautement significatif sur les teneurs en sucres solubles accumulées dans les feuilles et racines de *Vicia faba* L.

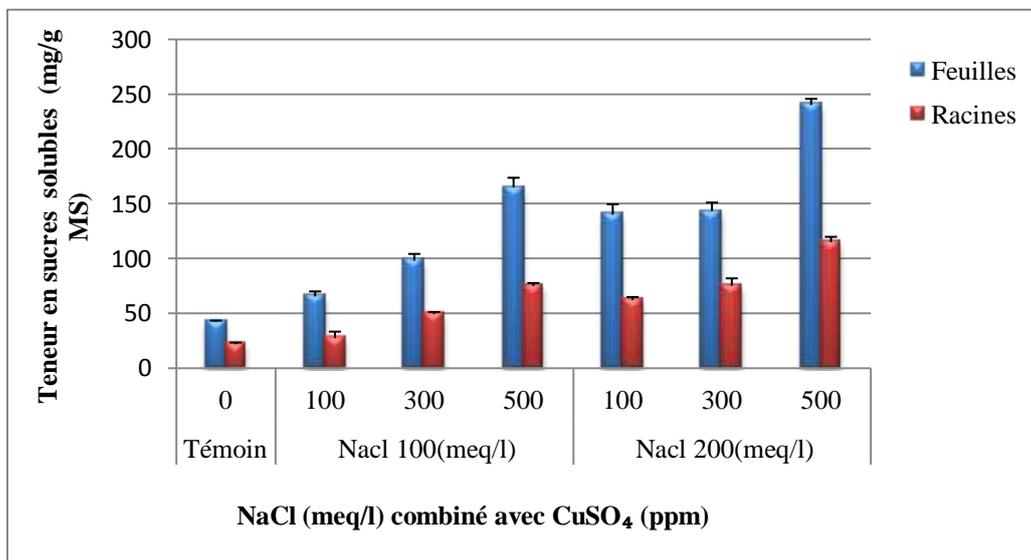


Figure 54- Teneur en sucres solubles (mg/g Ms) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre.

Tableau 45 - Teneur en sucres solubles (mg/g Ms) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre \pm l'écart type.

NaCl (meq/l)	CuSO ₄ (ppm)	Feuilles	Racines
0	0	42,424 \pm 0,891	21,821 \pm 1,456
100 (meq/l)	100	65,402 \pm 4,504	27,245 \pm 5,972
	300	97,891 \pm 6,236	49,221 \pm 1,854
	500	164,959 \pm 8,638	74,87 \pm 2,707
200 (meq/l)	100	139,88 \pm 9,547	61,951 \pm 2,855
	300	143,363 \pm 7,593	75,092 \pm 6,715
	500	239,975 \pm 5,614	114,864 \pm 4,842

b. Effet combiné NaCl+ZnSO₄

Les résultats obtenus (Figure.55) révèlent que l'augmentation des doses de Zn-NaCl provoque une accumulation de la teneur en sucres solubles dans les deux parties aérienne et racinaire de la fève. D'autre part, on note une diminution en sucres solubles pour les doses stressantes de 300 ppm (36.577 et 19.701 mg/g MS) et 500 ppm (33.116 et 21,302 mg/g MS) de Zn combinées avec 100meq/l de NaCl comparativement au témoin (42.424 et 21.821 mg/g MS) dans les parties aérienne et racinaire respectivement (Tableau.46).

L'interaction Zn-NaCl induit une accumulation plus importante en sucres solubles chez les plantes stressée avec 200 meq/l de NaCl.

L'analyse de la variance montre que l'effet de l'interaction Zn-NaCl est très hautement significatif sur les teneurs en sucres solubles accumulées dans les feuilles et racines de *Vicia faba* L.

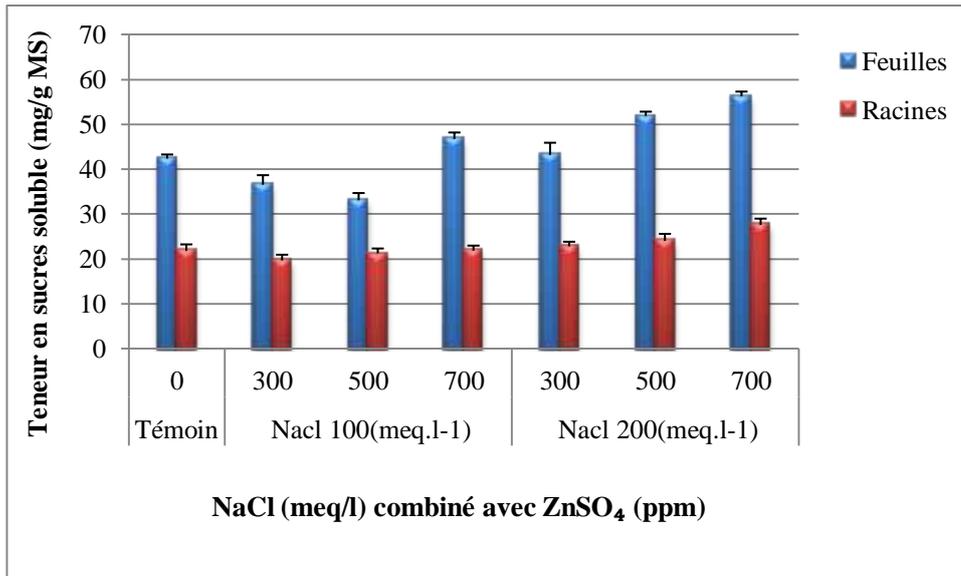


Figure 55- Teneur en sucres solubles (mg/g Ms) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc.

Tableau 46 - Teneur en sucres solubles (mg/g Ms) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc ± l'écart type.

NaCl (meq/l)	ZnSO ₄ (ppm)	Feuilles	Racines
0	0	42,424±0,891	21,821±1,456
100 (meq/l)	300	36,577±2,13	19,701±1,273
	500	33,116±1,601	21,302±1,057
	700	46,755±1,462	21,871±1,131
200 (meq/l)	300	43,218±2,716	22,853±1,016
	500	51,922±0,937	24,054±1,57
	700	56,274±1,065	27,613±1,403

2.4. Teneur en protéines totales

2.4.1. Effet de NaCl sur la teneur en protéines des feuilles et racines de *Vicia faba* L.

La teneur en protéines de la plante traitée par le NaCl diminue inversement proportionnelle dans les deux parties de la plante, ou cette teneur est plus importante dans la partie aérienne comparativement à la partie racinaire de la fève (Figure.56).

Les teneurs en protéines sont les plus importantes à la dose de 100 meq/l de NaCl.

On note également que les valeurs les plus basses ont été enregistrées chez les plantes traitées avec 200 meq/l de NaCl (73,607 et 24,501 mg/g MF) comparativement au témoin (100,293 et 40,946 mg/g MF) respectivement (partie aérienne, racinaire), (Tableau.47).

L'analyse de la variance révèle que le NaCl a un effet très hautement significatif sur la teneur en protéine dans les feuilles et racines de la fève.

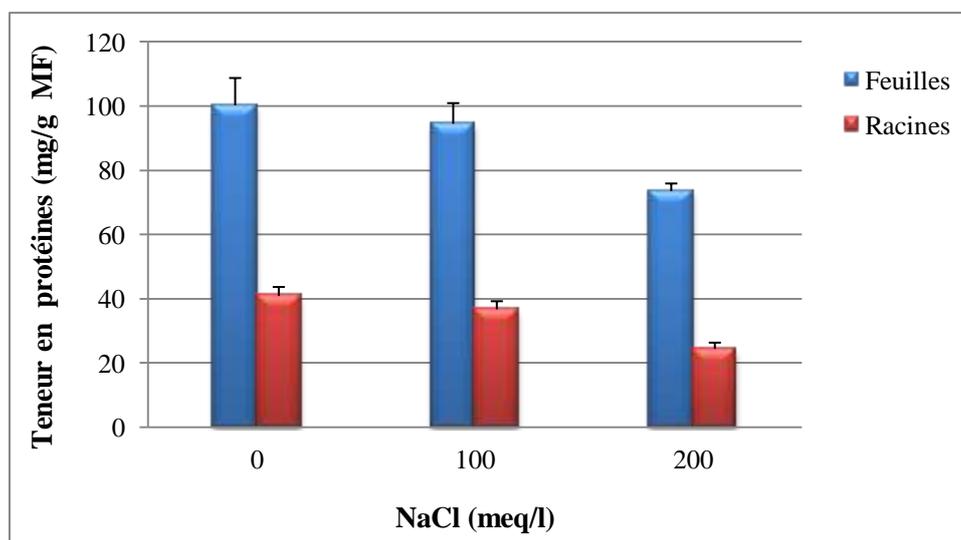


Figure 56- Teneur en protéines totales (mg/g MF) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl.

Tableau 47 - Teneur en protéines totales (mg/g MF) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl± l'écart type.

NaCl (meq/l)	Feuilles	Racines
0	100,293±8,514	40,946±2,816
100	94,54±6,446	36,803±2,535
200	73,607±2,361	24,501±1,932

2.4.2. Effet de Cuivre sur la teneur en protéines des feuilles et racines de *Vicia faba* L.

Les résultats montrent que le taux des protéines dans les parties aériennes et racinaires de la fève diminue inversement proportionnel avec l'augmentation de la concentration de cuivre (Figure. 57). La teneur en protéines de la partie aérienne de la plante est plus importante par rapport à celle de la partie racinaire.

L'application du stress au cuivre à des doses 100, 300 et 500 ppm a fait considérablement diminuer la teneur en protéines au niveau des feuilles et racines des plantes. Par ailleurs, les teneurs en protéine sont les plus importantes à la dose de 100 ppm de cuivre (Tableau.48).

L'analyse de la variance révèle que le cuivre a un effet très hautement significatif sur la teneur en protéines dans les feuilles et racines de la fève.

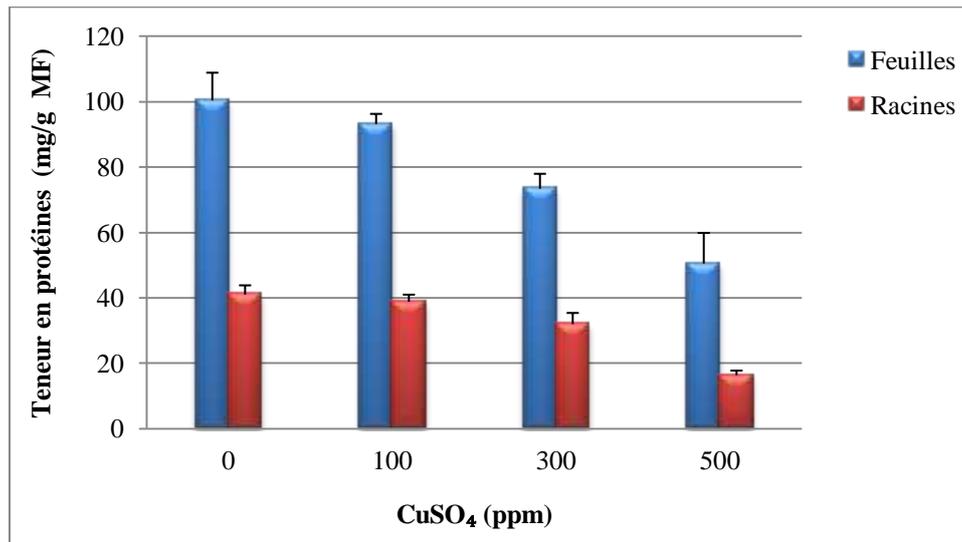


Figure 57- Teneur en protéines totales (mg/g MF) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre.

Tableau 48 - Teneur en protéines totales (mg/g MF) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre ± l'écart type.

CuSO ₄ (ppm)	Feuilles	Racines
0	100,293±8,514	40,946±2,816
100	93,089±3,118	38,737±2,172
300	73,307±4,575	31,884±3,436
500	50,44±9,357	16,276±1,406

2.4.3. Effet de Zinc sur la teneur en protéines des feuilles et racines de *Vicia faba* L.

Le taux des protéines dans les plantes de *Vicia faba* L. diminue inversement proportionnel avec les doses du zinc appliquées. Les teneurs en protéines sont plus importantes dans les feuilles par rapport aux racines de la plante (Figure 58).

On observe que la teneur la plus élevée en protéines est enregistrée à la dose de 300 ppm de zinc (128,922 et 64,736 mg/g MF). En revanche, la plus faible teneur en protéines est

marquée à la dose de 700 ppm de zinc (56,503 et 18,952 mg/g MF) comparativement au témoin (100,293 et 40,946 mg/g MF) dans la partie aérienne et racinaire respectivement (Tableau.49).

L'analyse de la variance révèle que le zinc a un effet très hautement significatif sur la teneur en protéines dans les feuilles et racines de la fève.

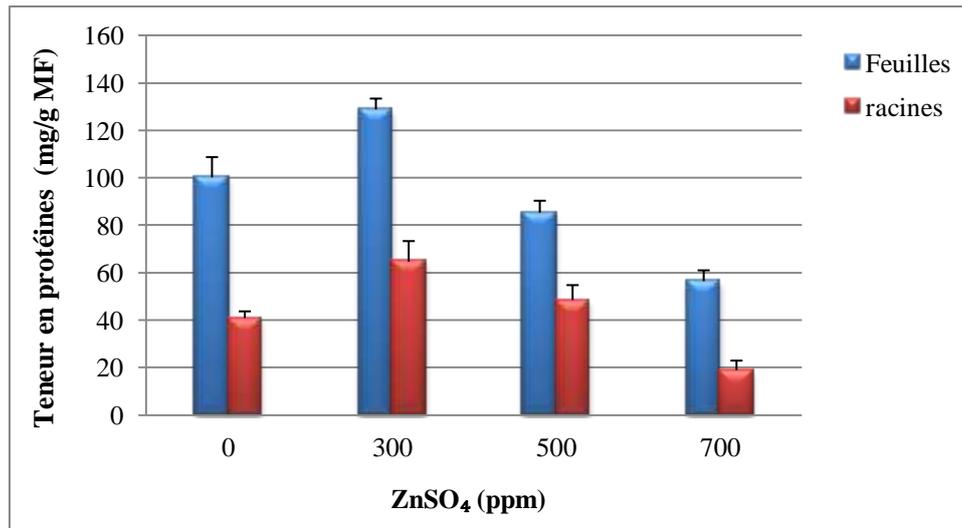


Figure 58- Teneur en protéines totales (mg/g MF) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc.

Tableau 49 - Teneur en protéines totales (mg/g MF) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc ± l'écart type.

ZnSO ₄ (ppm)	Feuilles	Racines
0	100,293±8,514	40,946±2,816
300	128,922±4,569	64,736±8,662
500	85,345±5,074	48,534±6,291
700	56,503±4,56	18,952±4,046

2.4.4. Effet combiné (salin et métallique) sur la teneur en protéines totales des feuilles et racines de *Vicia faba* L.

a. Effet combiné NaCl+CuSO₄

Les teneurs en protéines de la fève diminuent inversement proportionnelle sous l'effet de l'interaction Cu-NaCl par rapport au témoin. Ces teneurs est largement supérieures dans

les feuilles à ceux des racines (Figure.59). Les teneurs en protéines sont les plus importantes à la dose de 100 ppm de cuivre combiné avec 100 meq/l de NaCl.

On note que l'interaction Cu-NaCl induit une diminution beaucoup plus importante des teneurs en protéines chez les plantes stressées avec 200 meq/l de NaCl.

L'analyse statistique montre que l'effet de l'interaction Cu-NaCl sur le taux de protéine est très hautement significatif.

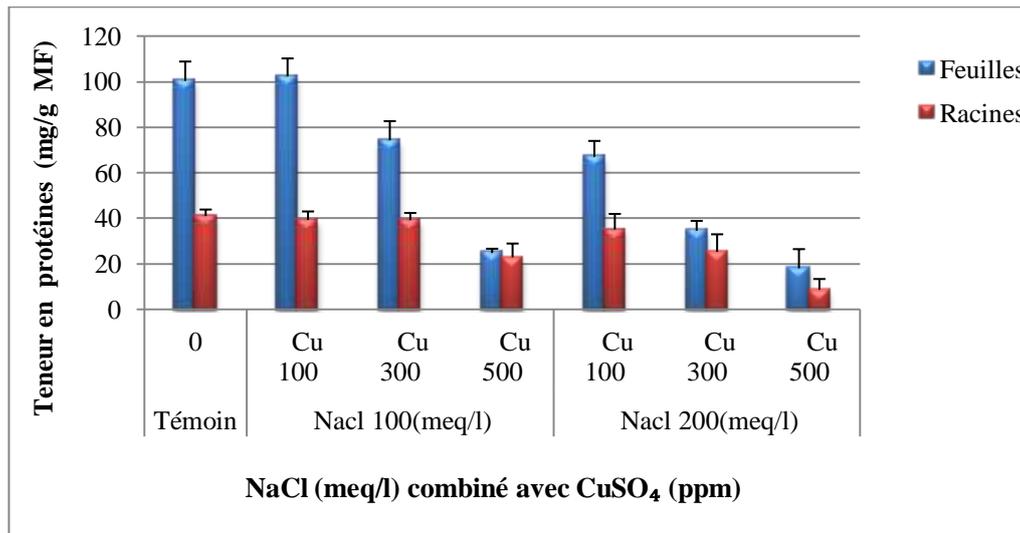


Figure 59- Teneur en protéines totales (mg/g MF) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre.

Tableau 50 - Teneur en protéines totales (mg/g MF) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre ± l'écart type.

NaCl (meq/l)	CuSO ₄ (ppm)	Feuilles	Racines
0	0	100,293±8,514	40,946±2,816
100 (meq/l)	100	102,273±7,908	39,186±3,724
	300	74,194±8,409	39,076±3,2
	500	24,633±1,901	22,764±6,047
200 (meq/l)	100	66,935±6,983	35,007±6,834
	300	34,457±4,315	25,183±7,695
	500	17,925±8,433	8,468±4,755

b. Effet combiné NaCl+ZnSO₄

Les résultats obtenus (Figure.60) montrent que la teneur en protéines dans les parties aérienne et racinaire de la fève diminue inversement proportionnelle sous l'effet de l'interaction Zn-NaCl par rapport au témoin. Cependant, les teneurs en protéines des plantes stressées à 300 ppm de zinc combiné avec 100 meq/l de NaCl augmentent à (130,425 et 44,648 mg/g MF) comparativement à celles des plantes témoins (100,293 et 40,946 mg/g MF), (Tableau 51).

Il faut signaler que l'interaction Zn-NaCl induit une diminution moins importante des teneurs en protéines chez les plantes stressée avec 100 meq/l de NaCl.

L'analyse statistique montre que l'effet de l'interaction Zn-NaCl sur le taux de protéine est très hautement significatif.

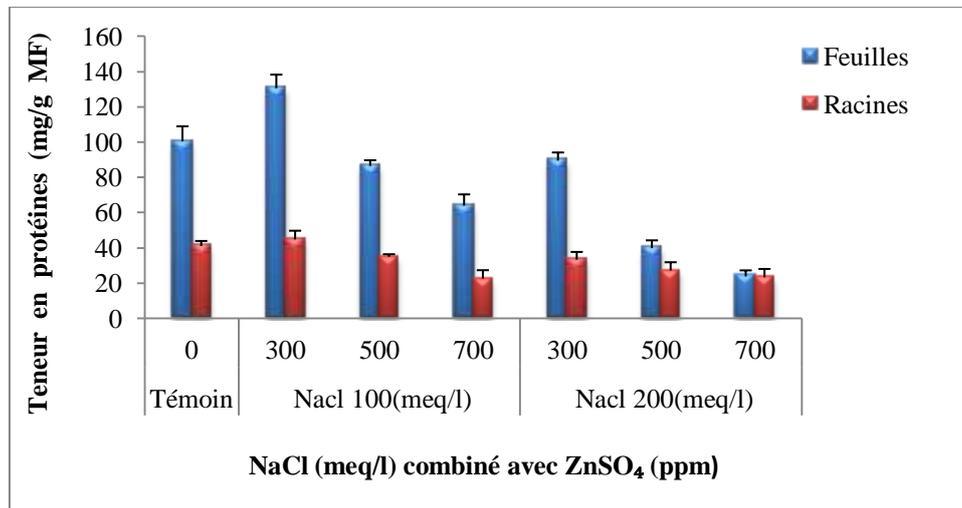


Figure 60- Teneur en protéines totales (mg/g MF) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc.

Tableau 51 - Teneur en protéines totales (mg/g MF) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc ± l'écart type.

NaCl (meq/l)	ZnSO ₄ (ppm)	Feuilles	Racines
0	0	100,293±8,514	40,946±2,816
100 (meq/l)	300	130,425±7,678	44,648±4,919
	500	86,364±3,181	34,787±1,453
	700	63,783±6,408	22,397±4,791
200 (meq/l)	300	89,369±4,582	33,174±4,372
	500	39,809±4,324	27,016±4,685

	700	23,68±3,413	23,13±4,755
--	-----	-------------	-------------

2.5. Teneur en polyphénols totaux

2.5.1. Effet de NaCl sur la teneur en polyphénols totaux des feuilles et racines de *Vicia faba L.*

Les résultats obtenus dans la figure 61 montrent que la teneur en polyphénols chez les plantes du *Vicia Faba L.* augmente au fur et à mesure avec les doses croissantes du NaCl appliquées. La teneur en polyphénols est importante dans les feuilles comparativement à celles des racines de la plante.

La teneur la plus élevée en polyphénols est enregistrée à la dose de 200 meq/l de NaCl (1,343 et 0,859 mg EAG/g MS) dans les parties aérienne et racinaire respectivement (Tableau.52).

L'analyse statistique révèle que l'accumulation de polyphénols totaux est très hautement significative dans les feuilles et les racines de la fève sous l'effet de NaCl.

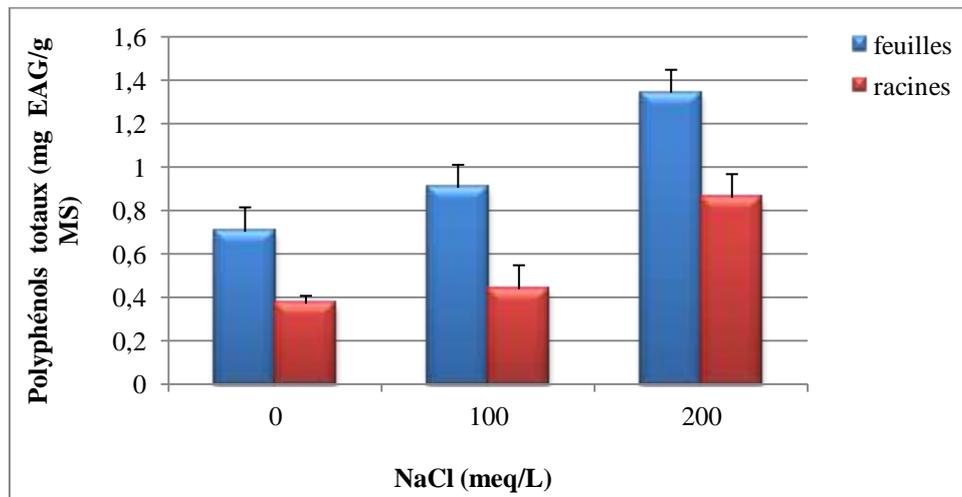


Figure 61- Teneur en polyphénols totaux (mg EAG/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba L.* sous l'effet de NaCl.

Tableau 52 - Teneur en polyphénols totaux (mg EAG/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba L.* sous l'effet de NaCl ± l'écart type.

NaCl (meq/l)	Feuilles	Racines
0	0,702±0,113	0,371±0,036
100	0,905±0,106	0,438±0,11
200	1,343±0,106	0,859±0,109

2.5.2. Effet de Cuivre sur la teneur en polyphénols totaux des feuilles et racines de *Vicia faba* L.

Le taux des polyphénols totaux dans les parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. augmente avec l'augmentation de la concentration de Cuivre. Les teneurs obtenus en polyphénols sont élevées dans les feuilles de la plante par rapport aux racines (Figure. 62).

La teneur la plus élevée en polyphénols est enregistrée à la dose de 500 ppm de Cuivre (1,305 et 0,841 mg EAG/g MS). En outre, la plus faible teneur en polyphénols est enregistrée au témoin (0,702 et 0,371 mg EAG/g MS) pour la partie aérienne et racinaire respectivement (Tableau.53). L'analyse statistique révèle que l'effet du Cuivre est très hautement significatif sur la teneur en polyphénols des parties aérienne et racinaire de la fève.

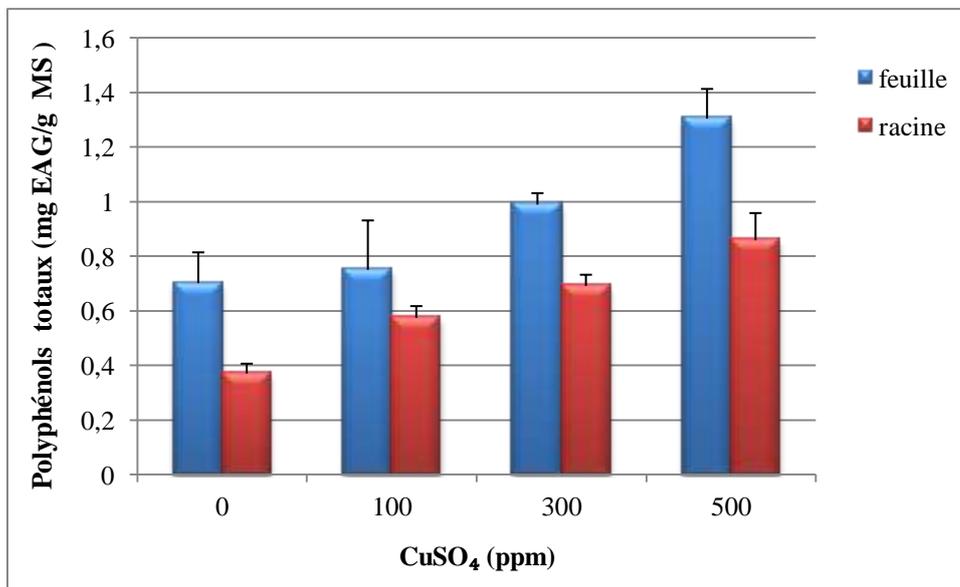


Figure 62- Teneur en polyphénols totaux (mg EAG/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre.

Tableau 53 - Teneur en polyphénols totaux (mg EAG/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre ± l'écart type.

CuSO ₄ (ppm)	Feuille	Racine
0	0,702±0,113	0,371±0,036
100	0,751±0,181	0,575±0,043
300	0,99±0,042	0,692±0,041
500	1,305±0,109	0,841±0,1

2.5.3. Effet de Zinc sur la teneur en polyphénols totaux des feuilles et racines de *Vicia faba* L.

Les résultats trouvés dans la figure 63 révèlent une augmentation de polyphénols totaux dans les feuilles et racines de *Vicia Faba* L. stressées au Zinc à différentes concentrations (300, 500 et 700 ppm). On note que le taux des polyphénols enregistré pour la partie aérienne est supérieur à celui enregistré pour la partie racinaire.

L'analyse statistique montre que l'effet de Zinc sur la teneur en polyphénols est très hautement significatif sur la teneur en polyphénols des parties aérienne et racinaire de la fève.

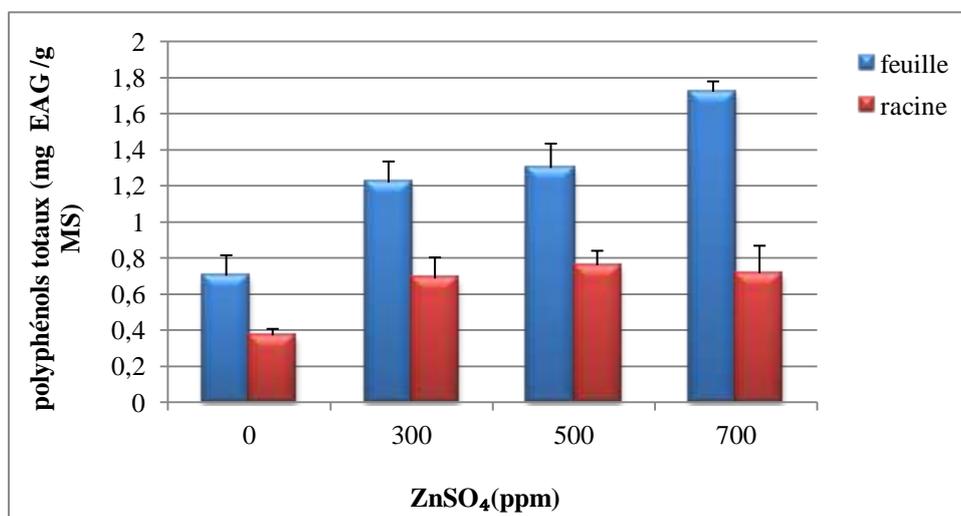


Figure 63- Teneur en polyphénols totaux (mg EAG/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc.

Tableau 54 - Teneur en polyphénols totaux (mg EAG/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc ± l'écart type.

ZnSO ₄ (ppm)	Feuille	Racine
0	0,702±0,113	0,371±0,036
300	1,218±0,117	0,686±0,117
500	1,299±0,135	0,76±0,08
700	1,722±0,057	0,715±0,153

2.5.4. Effet combiné (salin et métallique) sur la teneur en polyphénols totaux des feuilles et racines de *Vicia faba* L.

a. Effet combiné NaCl+CuSO₄

La teneur en polyphénols totaux sous l'interaction Cu-NaCl augmente proportionnellement dans les parties aérienne et racinaire de la plante (Figure.64). On note que l'interaction Cu-NaCl induit une accumulation beaucoup plus importante en polyphénols chez les plantes stressée avec 200 meq/l de NaCl.

Les résultats obtenus (Tableau.55) montrent que l'accumulation de polyphénols totaux est plus importante dans les feuilles comparativement dans les racines de la plante *Vicia Faba* L. Les teneurs les plus élevées en polyphénols sont enregistrées à la dose de 500 ppm de Cu combinée avec 100meq/l de NaCl (2,173 et 1,224 mg EAG/g MS) et 500 ppm de Cu combinée avec 200 meq/l de NaCl (2,727 et 1,33 mg EAG/g MS). En revanche, la plus faible teneur en polyphénols est enregistrée au témoin (0,702 et 0,371 mg EAG/g MS) dans les parties aérienne et racinaire respectivement.

L'analyse de la variance montre que l'effet de l'interaction Cu-NaCl est très hautement significatif sur les teneurs en polyphénols totaux accumulées dans les feuilles et racines de *Vicia faba* L.

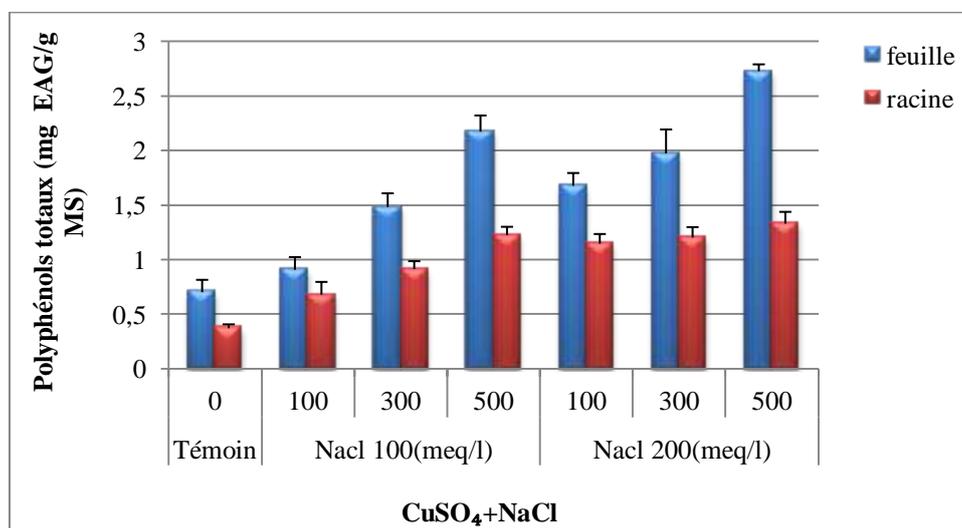


Figure 64- Teneur en polyphénols totaux (mg EAG/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre.

Tableau 55 -Teneur en polyphénols totaux (mg EAG/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre.

NaCl (meq/l)	CuSO ₄ (ppm)	Feuille	Racine
0	0	0,702±0,113	0,371±0,036
100 (meq/l)	100	0,907±0,116	0,679±0,117
	300	1,482±0,126	0,913±0,073
	500	2,173±0,148	1,224±0,077
200 (meq/l)	100	1,677±0,117	1,146±0,089
	300	1,973±0,22	1,202±0,096
	500	2,727±0,063	1,33±0,108

b. Effet combiné NaCl+ZnSO₄

Le taux de polyphénols totaux dans les feuilles et racines de la fève augmente proportionnellement avec les doses de l'interaction Zn-NaCl appliquées à la plante. On note également que la teneur en polyphénols est moins importante dans les racines par rapport aux feuilles (Figure.65).

On observe que l'interaction Zn-NaCl induit une accumulation beaucoup plus importante en polyphénols chez les plantes stressée avec 200 meq/l de NaCl.

La teneur la plus élevée en polyphénols est enregistrée à la dose de 700 ppm de Zn combinée avec 200 meq/l de NaCl (2,593 et 1,064 mg EAG/g MS). En revanche, le plus faible taux en polyphénols est enregistré au témoin (0,702 et 0,371 mg EAG/g MS) dans les parties aérienne et racinaire respectivement (Tableau.56).

L'analyse de la variance montre que l'effet de l'interaction Zn-NaCl est très hautement significatif sur les teneurs en polyphénols totaux de *Vicia faba* L.

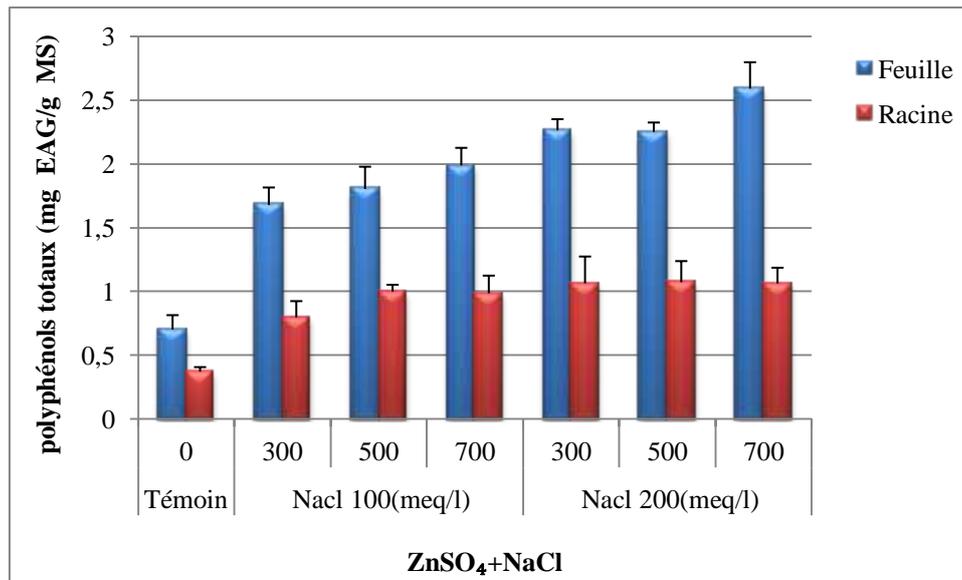


Figure 65- Teneur en polyphénols totaux (mg EAG/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc.

Tableau 56 - Teneur en polyphénols totaux (mg EAG/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc.

NaCl (meq/l)	ZnSO ₄ (ppm)	Feuille	Racine
0	0	0,702±0,113	0,371±0,036
100 (meq/l)	300	1,679±0,138	0,797±0,128
	500	1,805±0,175	0,999±0,054
	700	1,99±0,138	0,987±0,138
200 (meq/l)	300	2,265±0,088	1,065±0,21
	500	2,253±0,074	1,073±0,166
	700	2,593±0,207	1,064±0,123

2.6. Teneur en flavonoïdes

2.6.1. Effet de NaCl sur la teneur en flavonoïdes des feuilles et racines de *Vicia faba* L.

Les résultats révèlent que le NaCl appliqué à 100 et 200 meq/l entraîne une augmentation proportionnelle du taux des flavonoïdes dans les feuilles et les racines de la fève. Les teneurs en flavonoïdes sont plus importantes dans les feuilles par rapport à celles enregistrées dans les racines (Figure.66).

Il est important de noter que le traitement du *Vicia faba* L. par le NaCl à 200 meq/l induit une accumulation importante en flavonoïdes (0,154 et 0,09 mg EQ/g MS) comparativement au témoin (0,062 et 0,031 mg EQ/g MS), (Tableau.57).

L'analyse statistique montre que les flavonoïdes s'accumulent de manière très hautement significative dans les feuilles et les racines de la plante sous l'effet de NaCl.

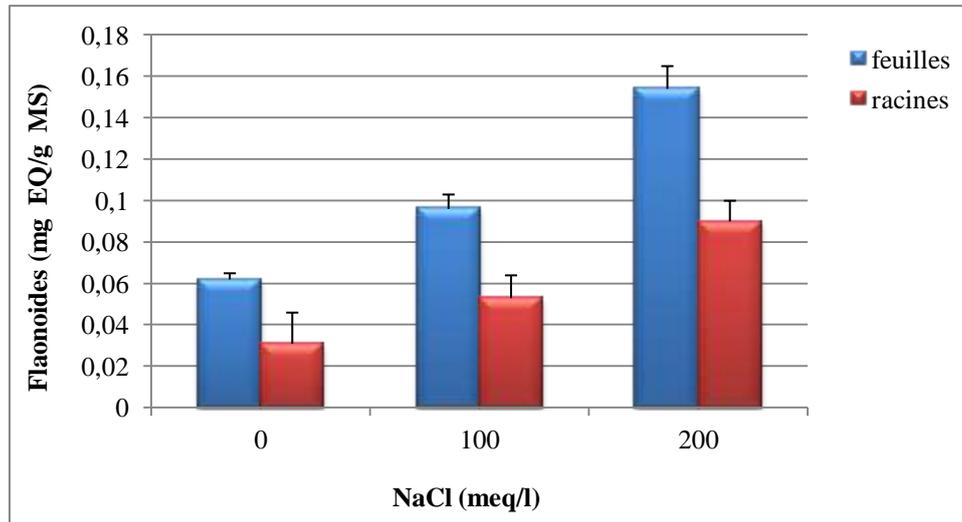


Figure 66- Teneur en flavonoïdes (mg EQ/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl.

Tableau 57 - Teneur en flavonoïdes (mg EQ/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl.

NaCl (meq/l)	Feuilles	Racines
0	0,062±0,003	0,031±0,015
100	0,096±0,007	0,053±0,011
200	0,154±0,011	0,09±0,01

2.6.2. Effet de Cuivre sur la teneur en flavonoïdes des feuilles et racines de *Vicia faba* L.

Le taux de flavonoïdes dans les feuilles et racines de la fève augmente proportionnellement avec les doses du Cuivre appliquées à la plante. La teneur en flavonoïdes est plus importante dans les feuilles comparativement aux racines (Figure 67).

Dans les feuilles, on note une légère diminution de flavonoïde pour la dose stressante de 100 ppm de Cuivre (0,057 mg EQ/g MS) comparativement au témoin (0,062 mg EQ/g MS)

.En revanche, la teneur la plus élevée (0,1 et 0,069 mg EQ/g MS) est obtenue pour le traitement de 500 ppm de Cuivre dans les parties aérienne et racinaire respectivement (Tableau 58). L'analyse statistique révèle que l'effet du Cuivre est très hautement significatif sur la teneur en flavonoïdes des parties aérienne et racinaire de la plante.

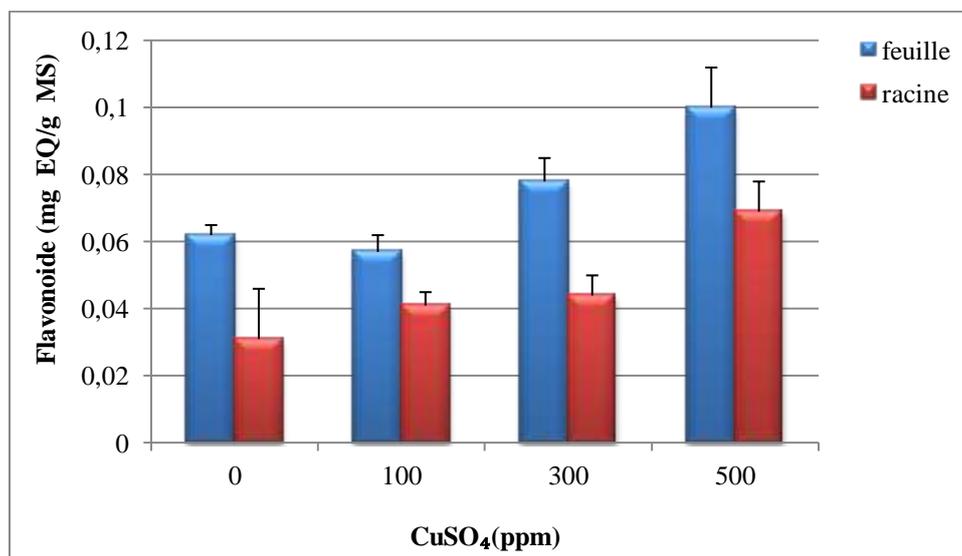


Figure 67- Teneur en flavonoïdes (mg EQ/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre.

Tableau 58 - Teneur en flavonoïdes (mg EQ/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Cuivre.

CuSO ₄ (ppm)	Feuille	Racine
0	0,062±0,003	0,031±0,015
100	0,057±0,005	0,041±0,004
300	0,078±0,007	0,044±0,006
500	0,1±0,012	0,069±0,009

2.6.3. Effet de Zinc sur la teneur en flavonoïdes des feuilles et racines de *Vicia faba* L.

Les résultats révèlent que le Zinc appliqué entraîne une augmentation proportionnelle du taux des flavonoïdes dans les feuilles et les racines de la plante (Figure.68). La teneur en flavonoïdes est importante dans les feuilles comparativement aux racines chez la fève.

Dans les feuilles, la teneur la plus élevée en flavonoïdes est enregistrée à la dose de 700 ppm de Zinc (0,132 mg EQ/g MS), tandis que dans ces racines la teneur en flavonoïdes diminue légèrement (0,066 mg EQ/g MS) comparativement à la dose de 500 ppm de Zinc (0,077 mg EQ/g MS). En outre, la plus faible teneur en flavonoïdes est enregistrée au témoin (0,062 et 0,031 mg EQ/g MS) pour la partie aérienne et racinaire respectivement (Tableau.59). L'analyse statistique révèle que l'effet du Zinc est très hautement significatif sur la teneur en flavonoïdes des parties aérienne et racinaire de la fève.

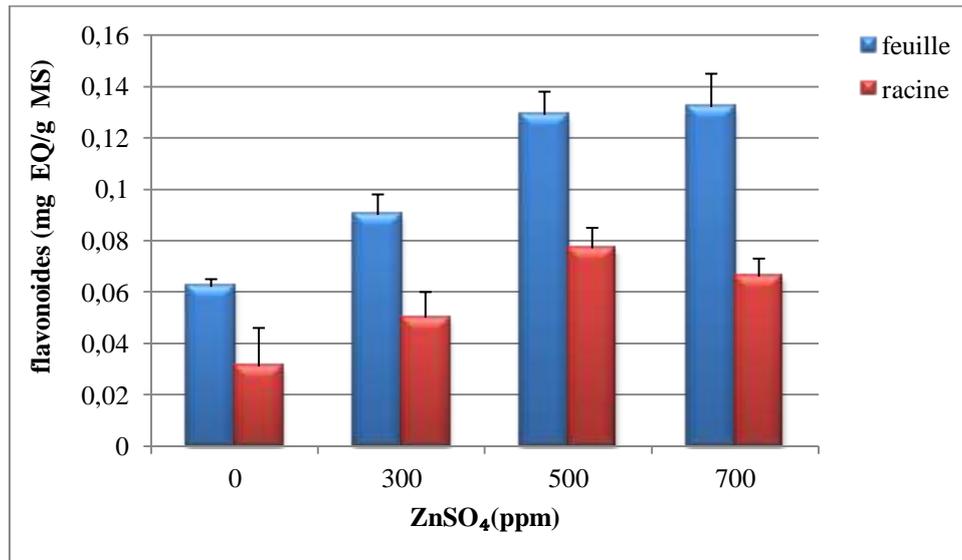


Figure 68- Teneur en flavonoïdes (mg EQ/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc.

Tableau 59- Teneur en flavonoïdes (mg EQ/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de Zinc.

ZnSO ₄ (ppm)	Feuille	Racine
0	0,062±0,003	0,031±0,015
300	0,09±0,008	0,05±0,01
500	0,129±0,009	0,077±0,008
700	0,132±0,013	0,066±0,007

2.6.4. Effet combiné (salin et métallique) sur la teneur en flavonoïdes des feuilles et racines de *Vicia faba* L.

a. Effet combiné NaCl+CuSO₄

Le taux des flavonoïdes dans les feuilles et racines de la fève augmente proportionnellement avec les doses de l'interaction Cu-NaCl appliquées à la plante. On note

également que la teneur en flavonoïdes est moins importante dans les racines par rapport aux feuilles (Figure.69).

On observe également que l'interaction Cu-NaCl induit une accumulation beaucoup plus importante en flavonoïdes chez les plantes stressée avec 200 meq/l de NaCl (Tableau.60).

L'analyse de la variance montre que l'effet de l'interaction Cu-NaCl est hautement significatif sur les teneurs en flavonoïdes de *Vicia faba* L.

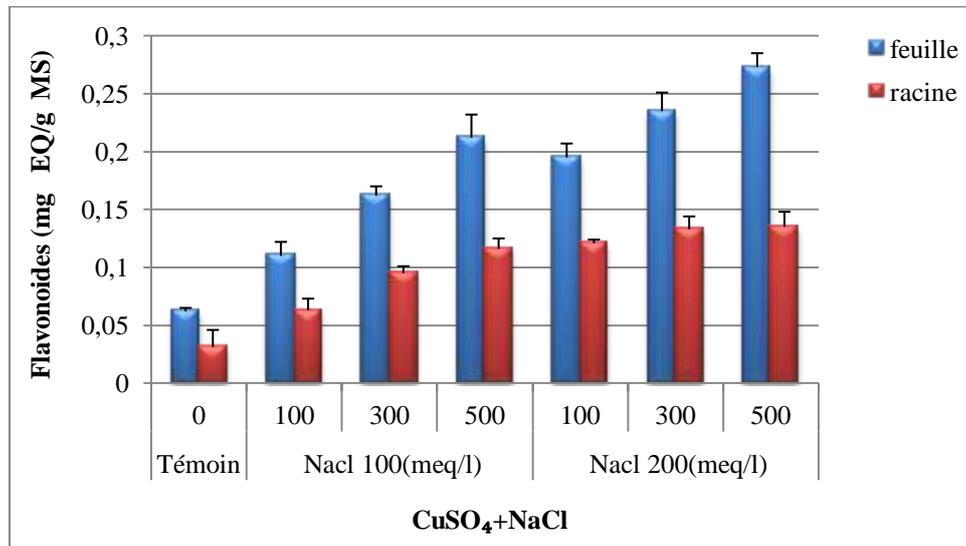


Figure 69- Teneur en en flavonoïdes (mg EQ/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre.

Tableau 60 - Teneur en en flavonoïdes (mg EQ/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Cuivre.

NaCl (meq/l)	CuSO ₄ (ppm)	Feuille	Racine
0	0	0,062±0,003	0,031±0,015
100 (meq/l)	100	0,11±0,012	0,063±0,01
	300	0,162±0,008	0,095±0,006
	500	0,212±0,02	0,116±0,009
200 (meq/l)	100	0,195±0,012	0,121±0,003
	300	0,235±0,016	0,133±0,011
	500	0,273±0,012	0,135±0,013

b. Effet combiné NaCl+ZnSO₄

Les résultats obtenus (Figure.70) révèlent que l'augmentation des doses de Zn-NaCl provoque une accumulation de la teneur en flavonoïdes dans les deux parties aérienne et racinaire de la fève. La teneur en flavonoïdes est plus importante dans les feuilles comparativement aux racines de la plante

L'interaction Zn-NaCl induit une accumulation plus importante en flavonoïdes chez les plantes stressées avec 200 meq/l de NaCl.

L'analyse de la variance montre que l'effet de l'interaction Zn-NaCl est hautement significatif sur les teneurs en flavonoïdes accumulées dans les feuilles et racines de *Vicia faba* L.

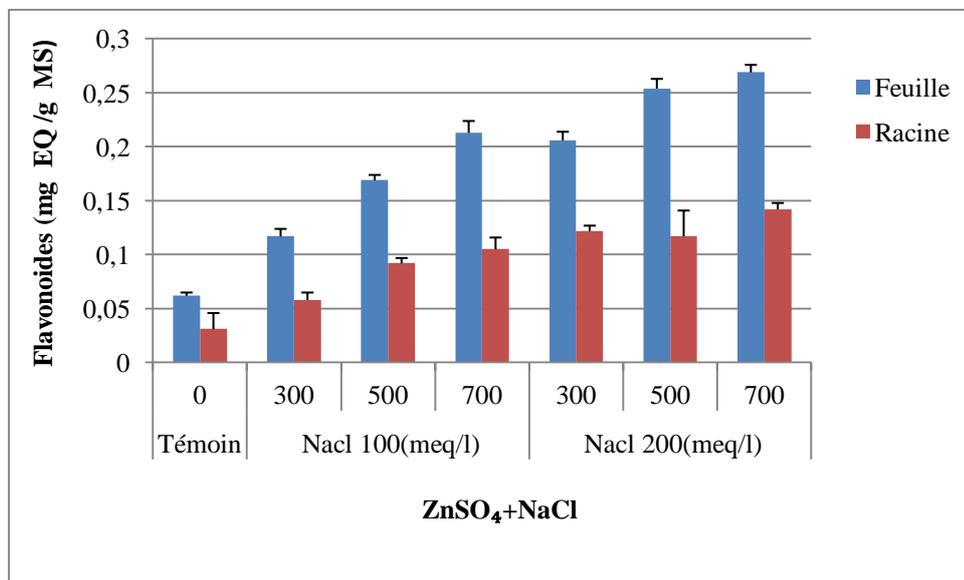


Figure 70- Teneur en flavonoïdes (mg EQ/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc.

Tableau 61 - Teneur en flavonoïdes (mg EQ/g MS) des feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous l'effet de l'interaction NaCl-Zinc.

NaCl (meq/l)	ZnSO ₄ (ppm)	Feuille	Racine
0	0	0,062±0,003	0,031±0,015
100 (meq/l)	300	0,117±0,007	0,058±0,007
	500	0,169±0,005	0,092±0,005
	700	0,213±0,011	0,105±0,011
	300	0,206±0,008	0,122±0,005

200 (meq/l)	500	0,254±0,009	0,117±0,024
	700	0,269±0,007	0,142±0,006

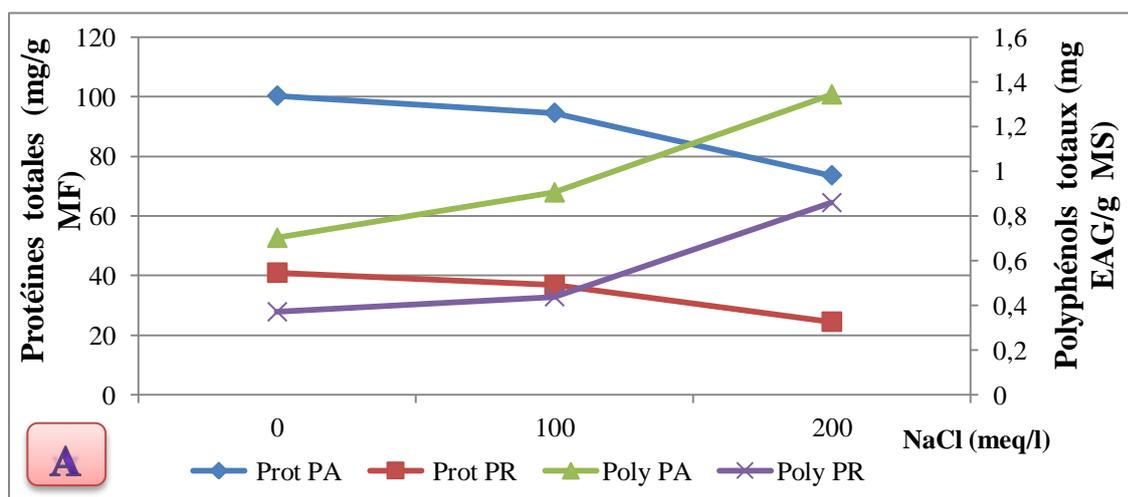
2.7.Relation entre osmorégulateurs et antioxydants

2.7.1. Sous l'effet de NaCl

L'analyse de la corrélation entre les osmorégulateurs et les antioxydants du *Vicia faba* L. sous l'effet du NaCl (Tableau.62), montre une forte corrélation négatives entre les antioxydants et les protéines totales (Figure.71 A, Figure.72 A). Néanmoins une forte corrélation positive à été enregistrée entre la proline et les antioxydants (Figure.70 B, Figure.71 B), et les sucres solubles et les antioxydants (Figure.71 C, Figure.72 C).

Tableau 62 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les antioxydants du *Vicia faba* L. sous l'effet du NaCl.

		Polyphénols totaux		Flavonoïdes	
		PA	PR	PA	PR
Protéines totales	PA	-0,99	-0,99	-0,98	-0,98
	PR	-0,99	-0,99	-0,99	-0,99
Proline	PA	0,98	0,99	0,97	0,97
	PR	0,99	0,98	0,99	0,99
Sucres solubles	PA	0,98	0,99	0,97	0,97
	PR	0,98	0,94	0,99	0,99



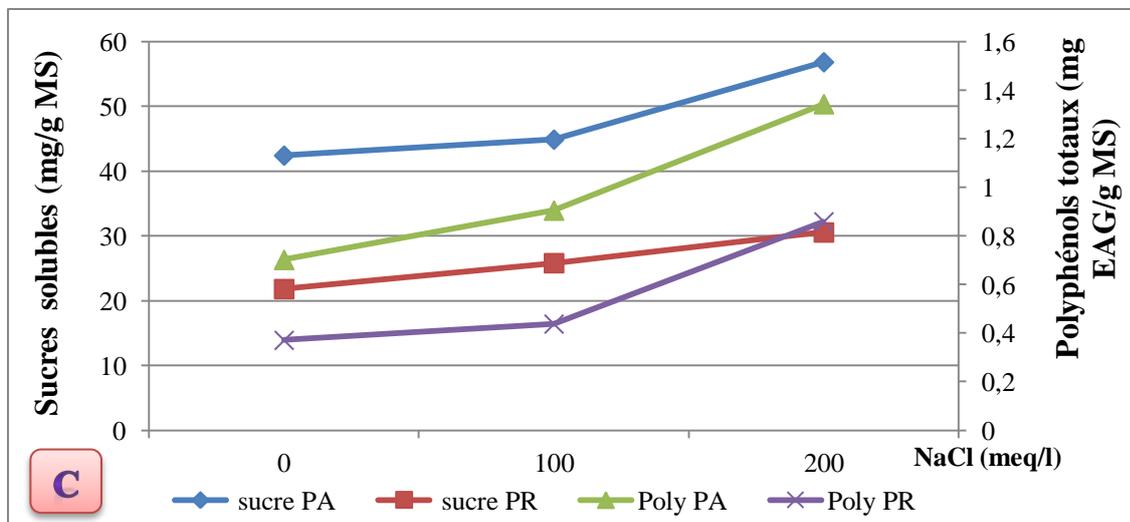
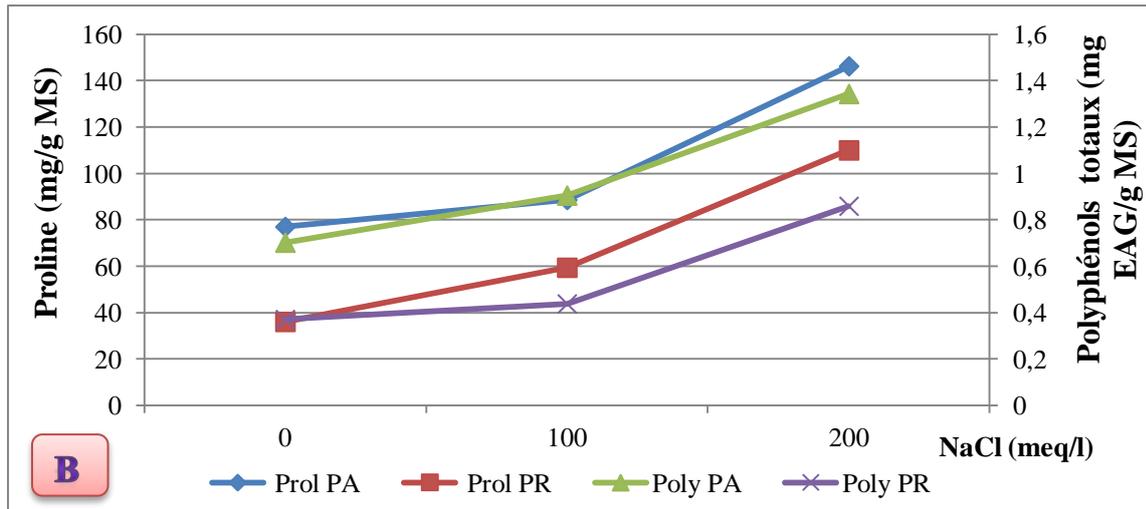
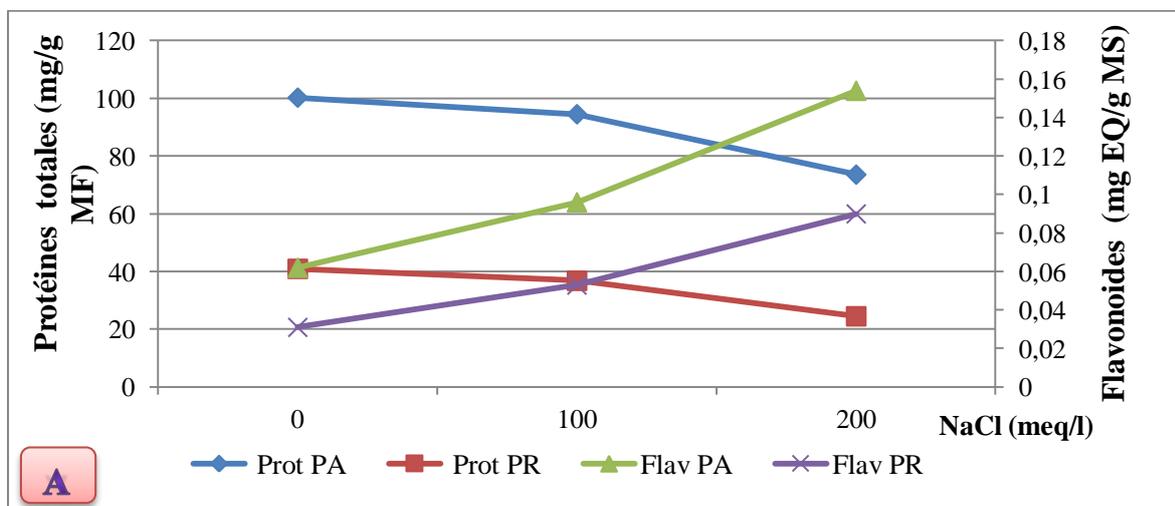


Figure 71 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les polyphénols totaux de *Vicia faba* L. sous l'effet du NaCl.



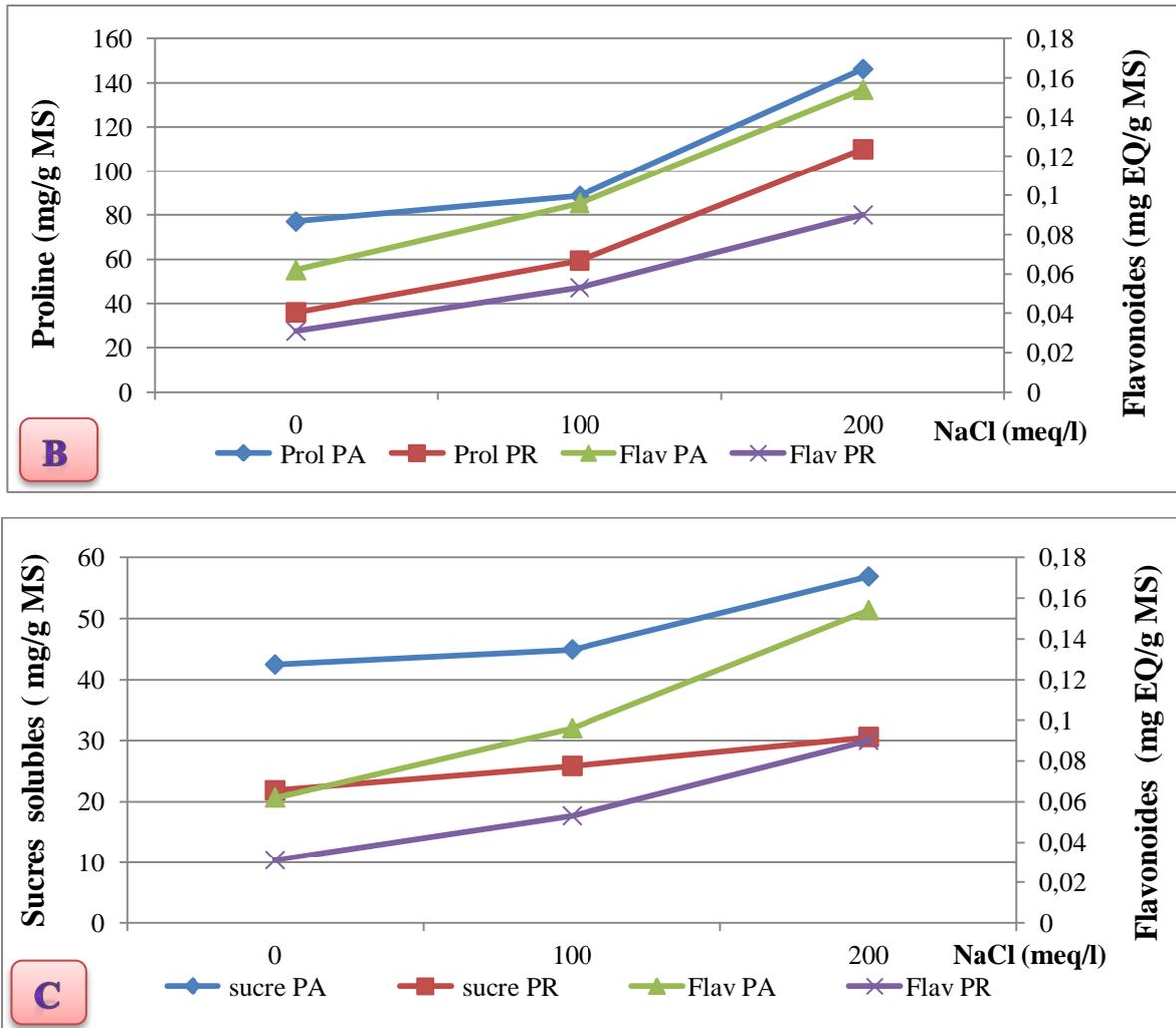


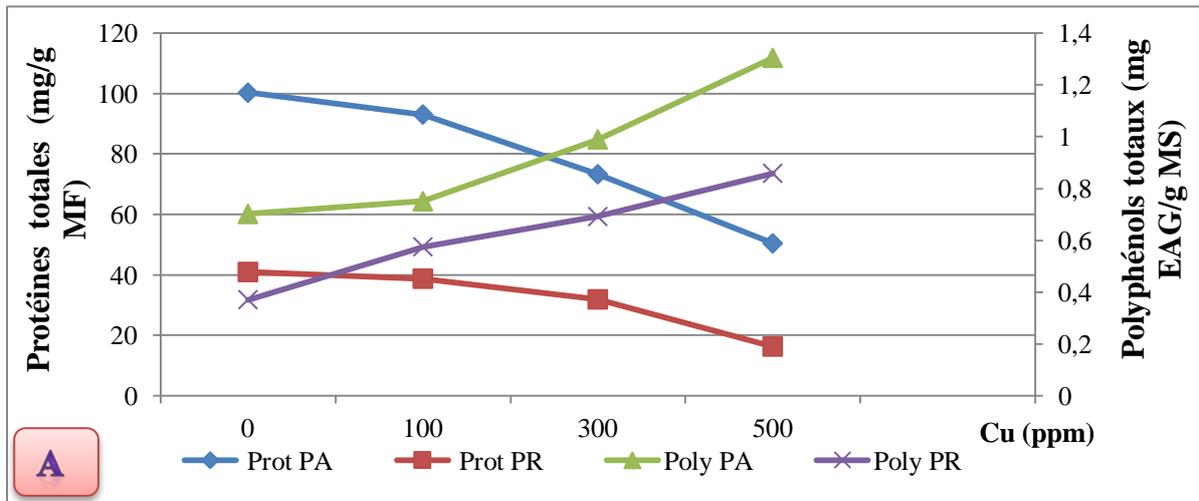
Figure 72 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les flavonoïdes de *Vicia faba* L. sous l'effet du NaCl.

2.7.2. Sous l'effet de Cuivre

Le test de Pearson révèle une forte corrélation négative entre les antioxydants et les protéines des parties aérienne et racinaire de la plante traitée par le Cuivre (Figure.73 A, Figure.74 A) (Tableau.63). Par contre, les antioxydants sont fortement corrélés positivement avec les osmorégulateurs proline (Figure.73 B, Figure.74 B), et les sucres solubles (Figure.73 C, Figure.74 C).

Tableau 63 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les antioxydants du *Vicia faba* L. sous l'effet du Cuivre.

		Polyphénols totaux		Flavonoïdes	
		PA	PR	PA	PR
Protéines totales	PA	-0,99	-0,95	-0,97	-0,95
	PR	-0,99	-0,91	-0,97	-0,97
Proline	PA	0,89	0,99	0,80	0,91
	PR	0,80	0,95	0,68	0,85
Sucres solubles	PA	0,92	0,74	0,97	0,82
	PR	0,96	0,84	0,99	0,86



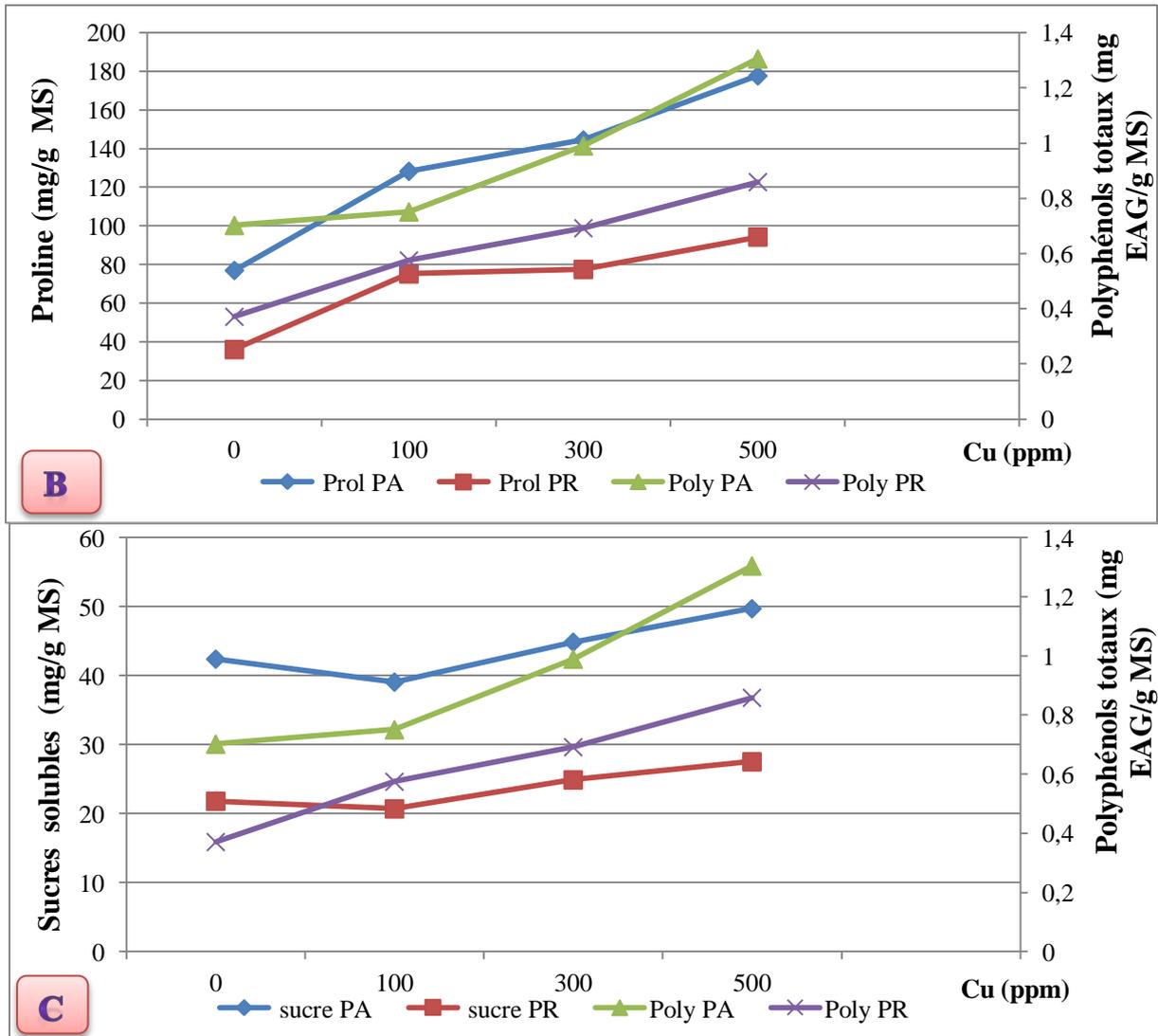
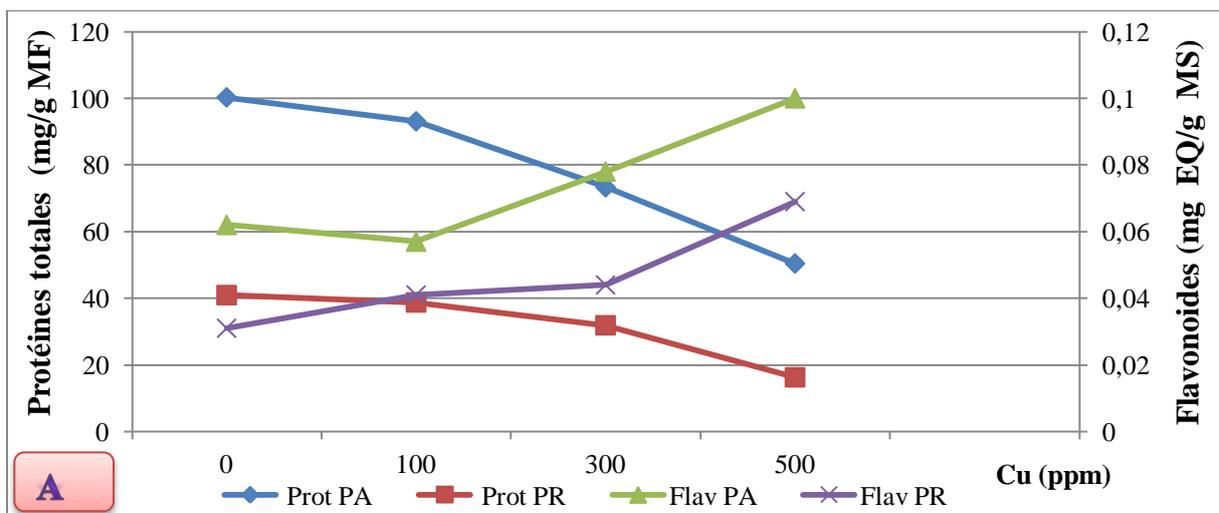


Figure 73 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les polyphénols totaux de *Vicia faba* L. sous l'effet du Cuivre.



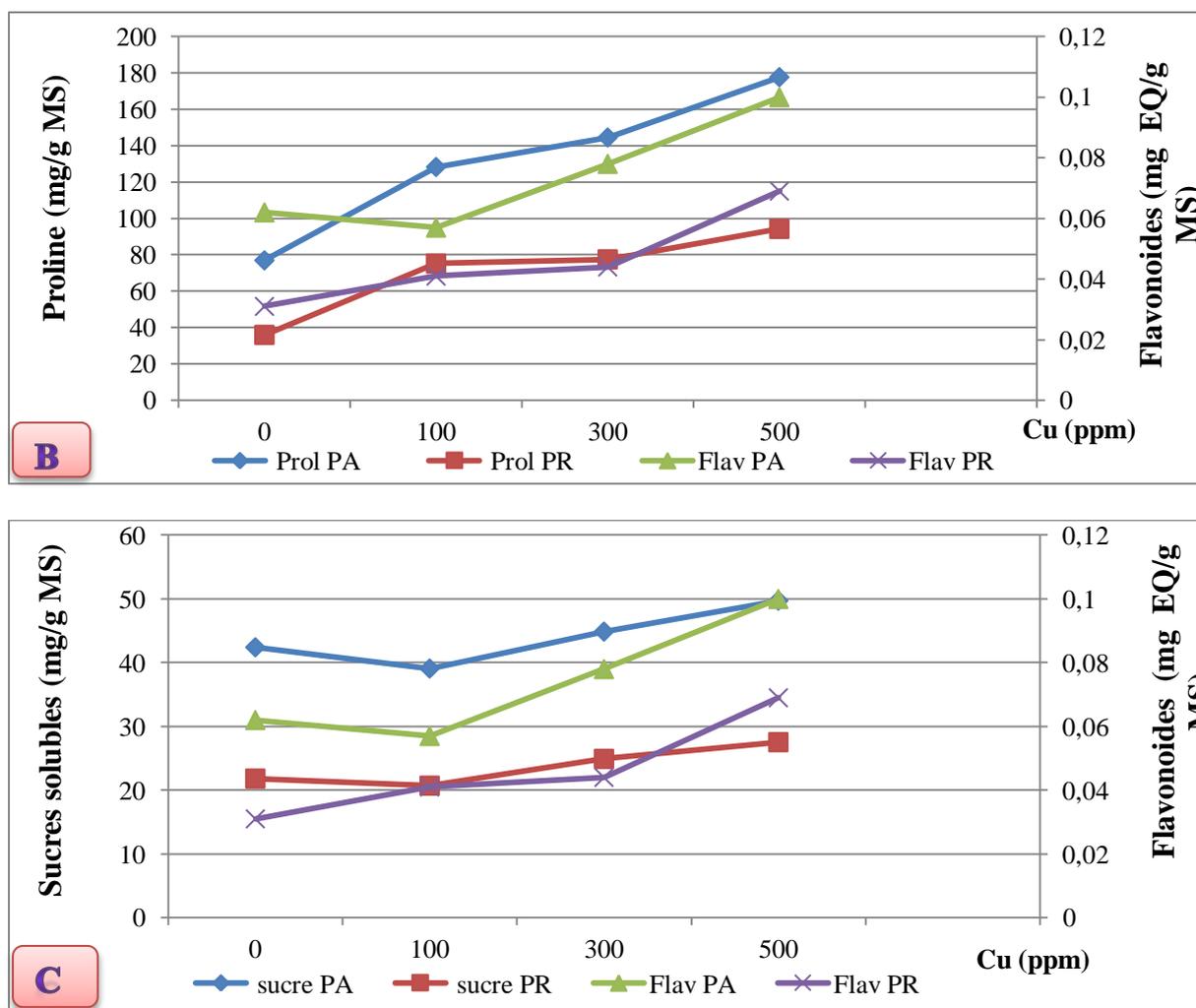


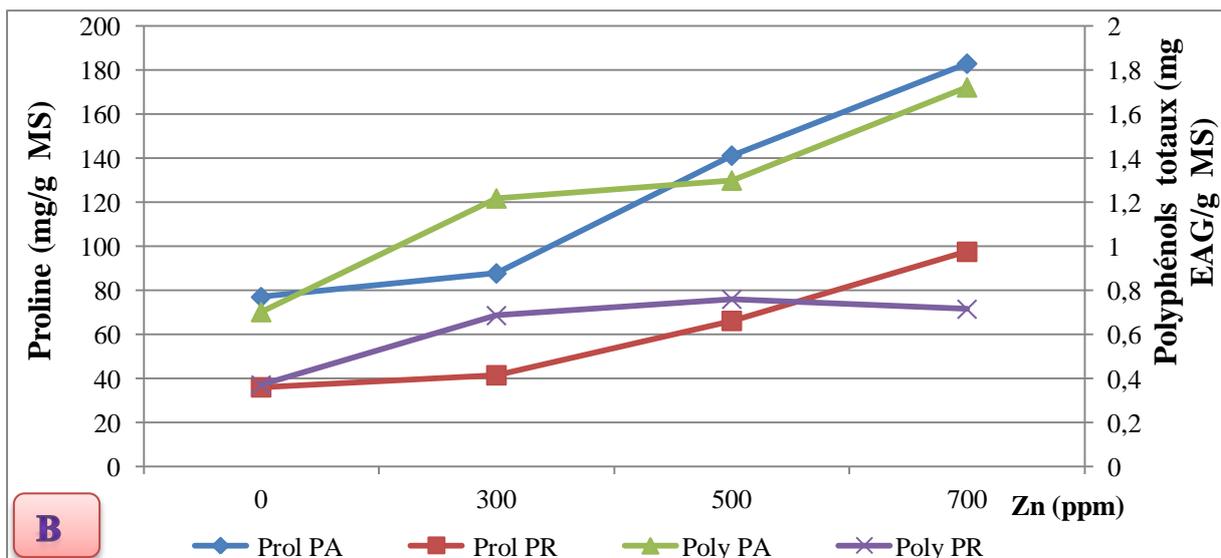
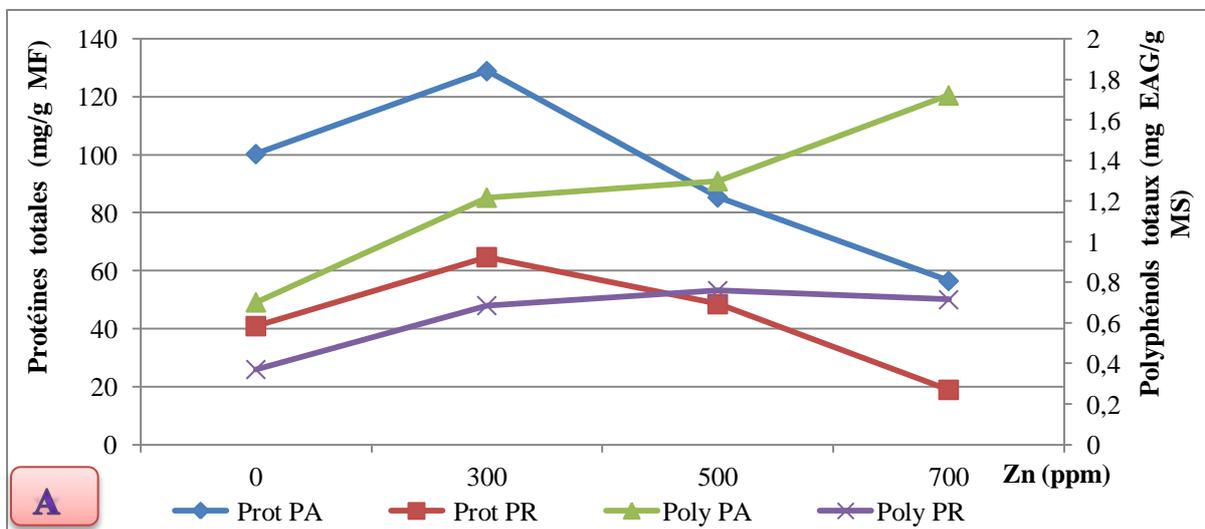
Figure 74 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les flavonoïdes de *Vicia faba* L. sous l'effet du Cuivre.

2.7.3. Sous l'effet de Zinc

Les antioxydants sont fortement corrélés positivement avec les prolines (Figure.75 B, Figure.76 B) et les sucres solubles (Figure.75 C, Figure.76 C) dans les deux parties aérienne et racinaire de la plante sous l'effet de Zinc (Tableau.64). Néanmoins une corrélation négative à été enregistrée entre les polyphénols et les protéines totales, tandis qu'on ne note aucune corrélation enregistrée entre la partie racinaire des protéines et les polyphénols (Figure.75 A, Figure.76 A).

Tableau 64 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les antioxydants du *Vicia faba* L. sous l'effet du Zinc.

		Polyphénols totaux		Flavonoïdes	
		PA	PR	PA	PR
Protéines totales	PA	-0,60	-0,24	-0,66	-0,50
	PR	-0,44	0,04	-0,39	-0,17
Proline	PA	0,89	0,66	0,92	0,79
	PR	0,90	0,61	0,87	0,72
Sucres solubles	PA	0,87	0,60	0,88	0,74
	PR	0,86	0,61	0,90	0,77



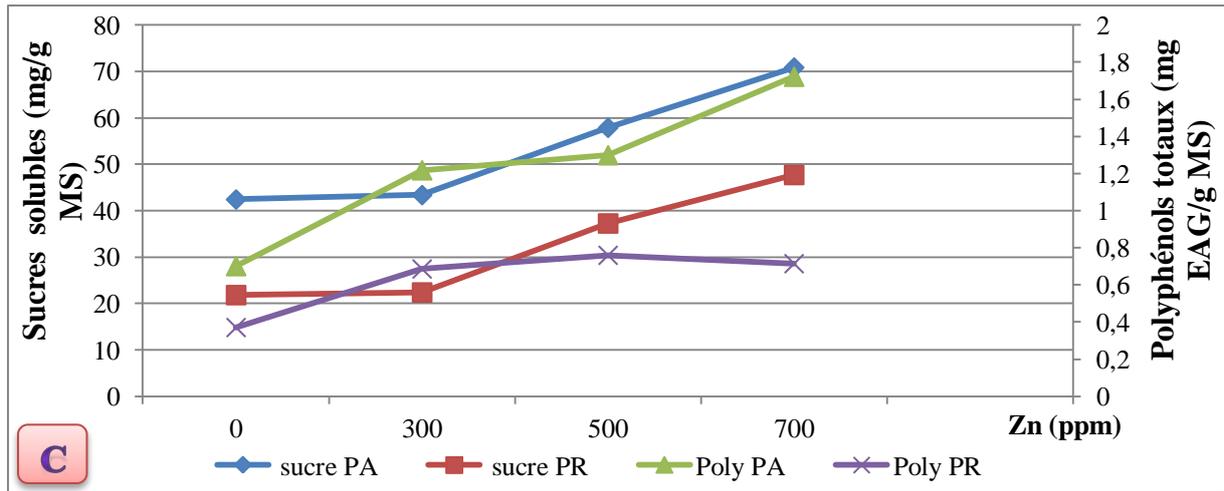
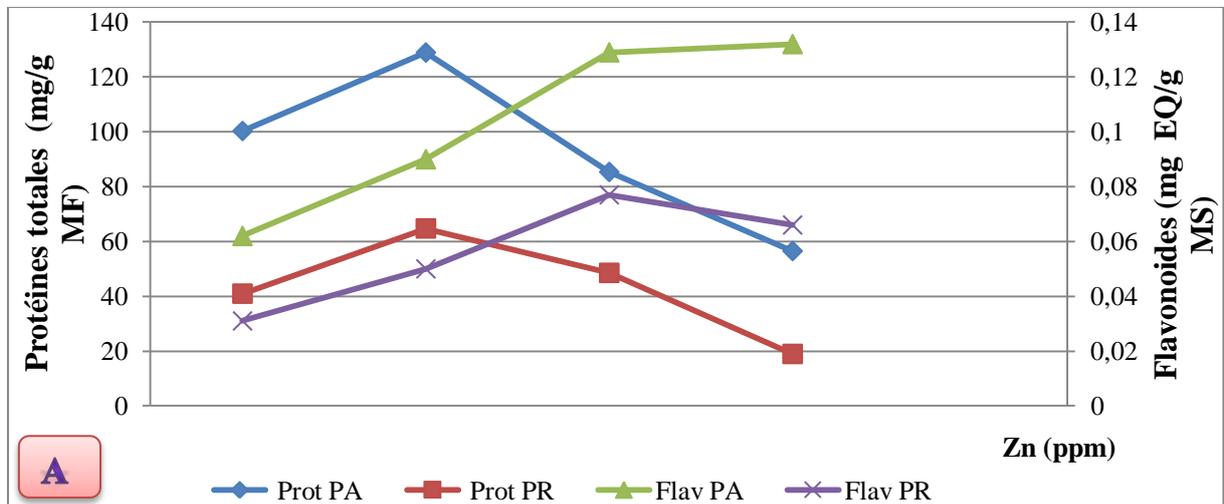


Figure 75 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les polyphénols totaux de *Vicia faba* L. sous l'effet du Zinc.



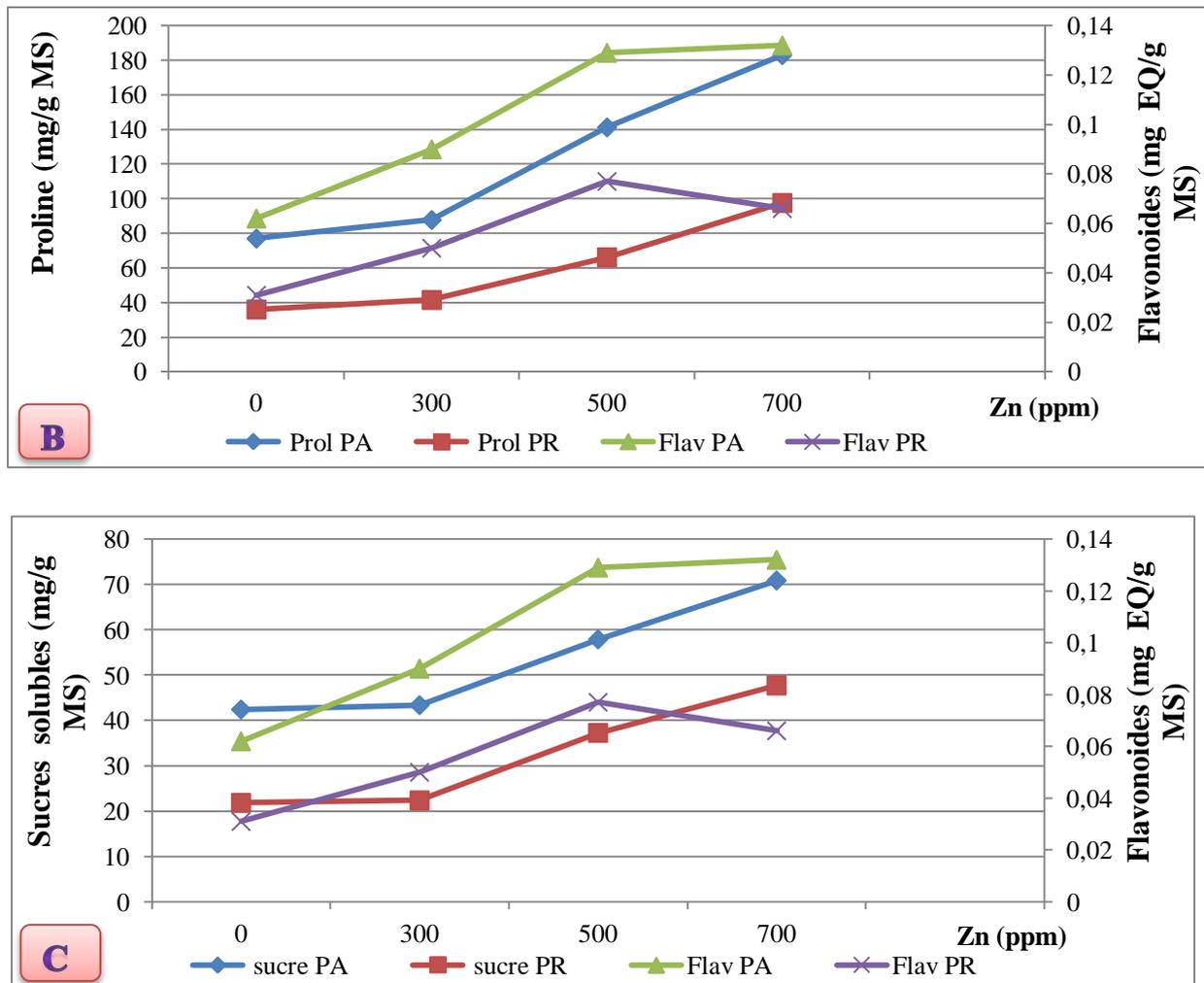


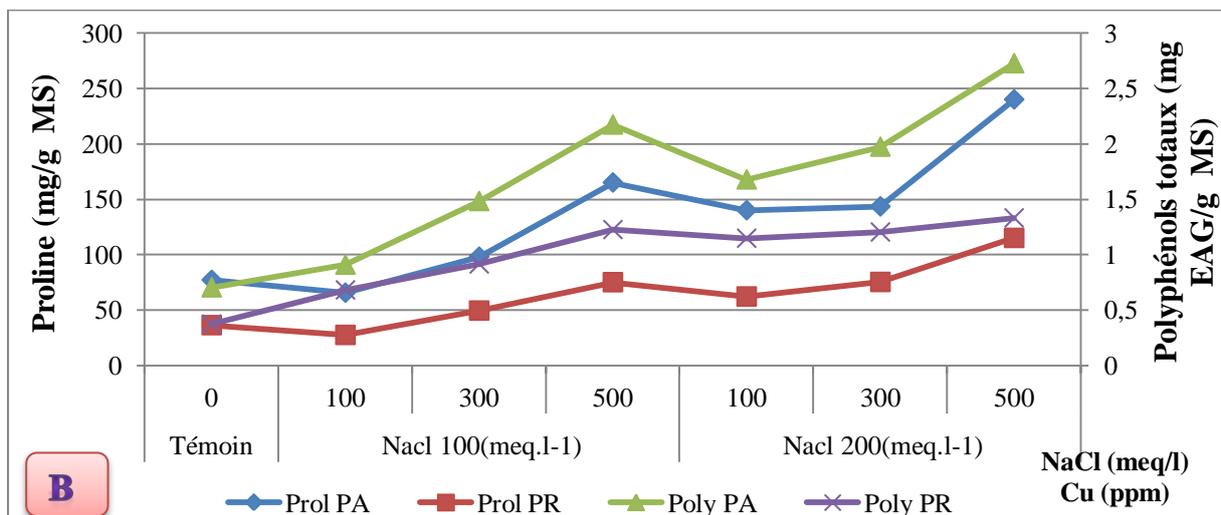
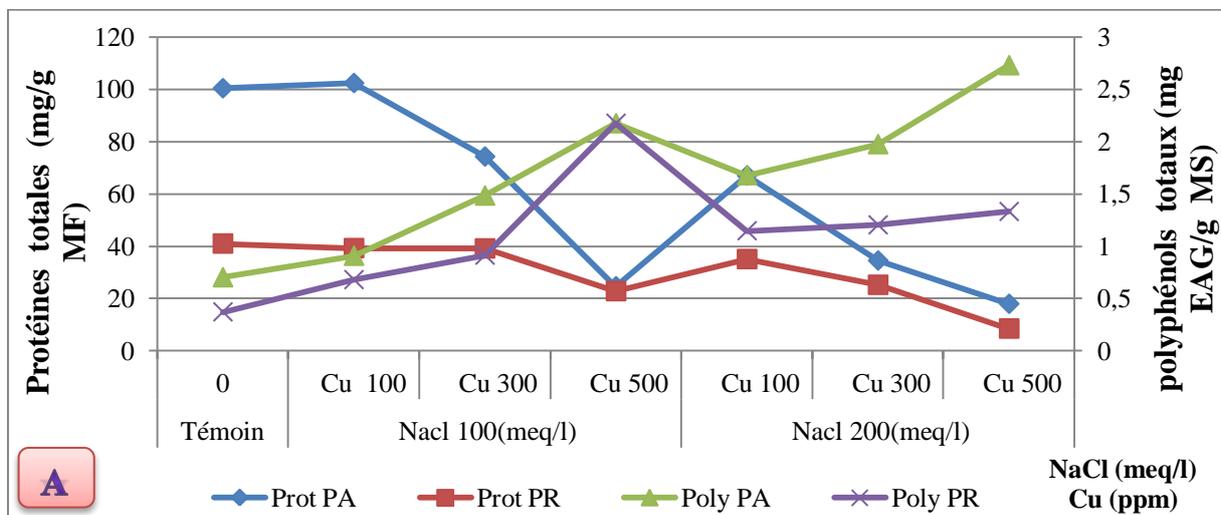
Figure 76 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les flavonoïdes de *Vicia faba* L. sous l'effet du Zinc.

2.7.4. Sous l'interaction NaCl-Cu

L'analyse de la corrélation entre les osmorégulateurs et les antioxydants du *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl-Cu (Tableau.65), révèle une forte corrélation négative entre les antioxydants et les protéines totales (Figure.77 A, Figure.78 A). Par contre, une forte corrélation positive à été enregistrée entre la proline et les antioxydants (Figure.77 B, Figure.78 B), et les sucres solubles et les antioxydants (Figure.77 C, Figure.78 C).

Tableau 65 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les antioxydants du *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl-Cu.

		Polyphénols totaux		Flavonoïdes	
		PA	PR	PA	PR
Protéines totales	PA	-0,96	-0,83	-0,93	-0,87
	PR	-0,93	-0,64	-0,86	-0,73
Proline	PA	0,95	0,66	0,89	0,80
	PR	0,96	0,62	0,91	0,81
Sucres solubles	PA	0,98	0,71	0,94	0,87
	PR	0,98	0,67	0,96	0,88



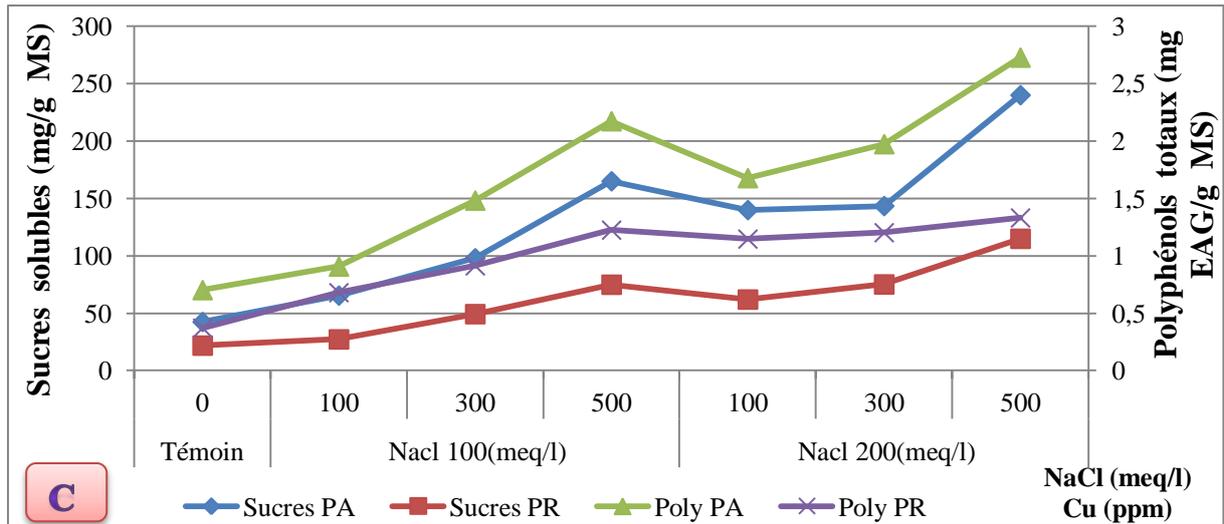
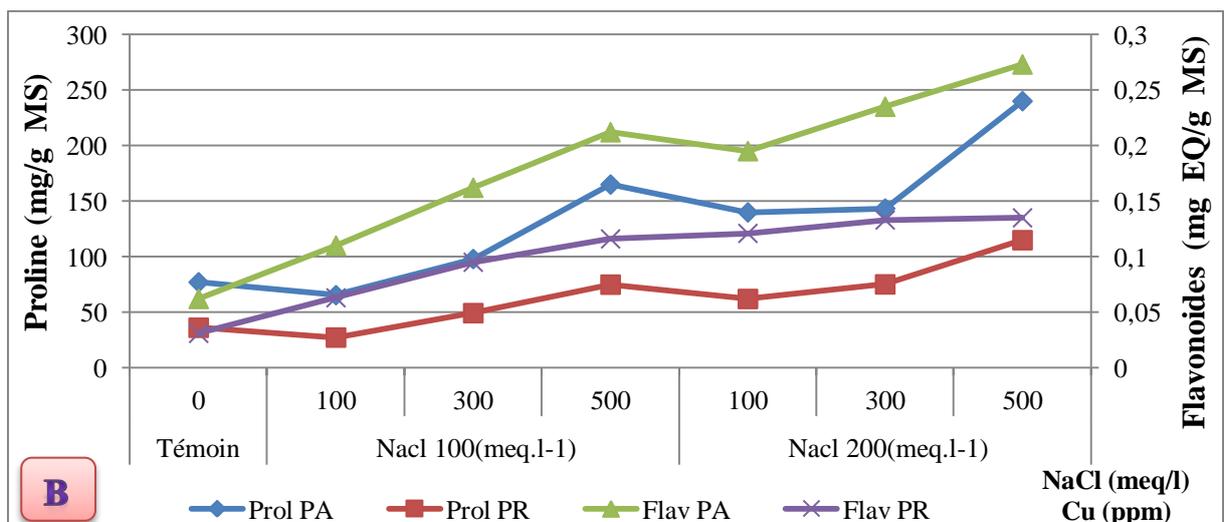
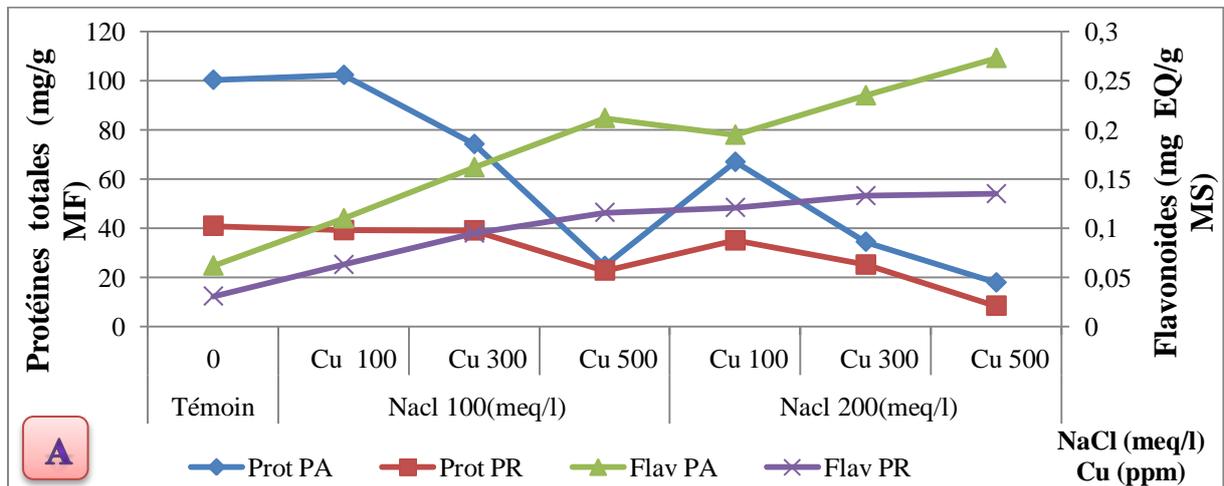


Figure 77 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les polyphénols totaux de *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl-Cu.



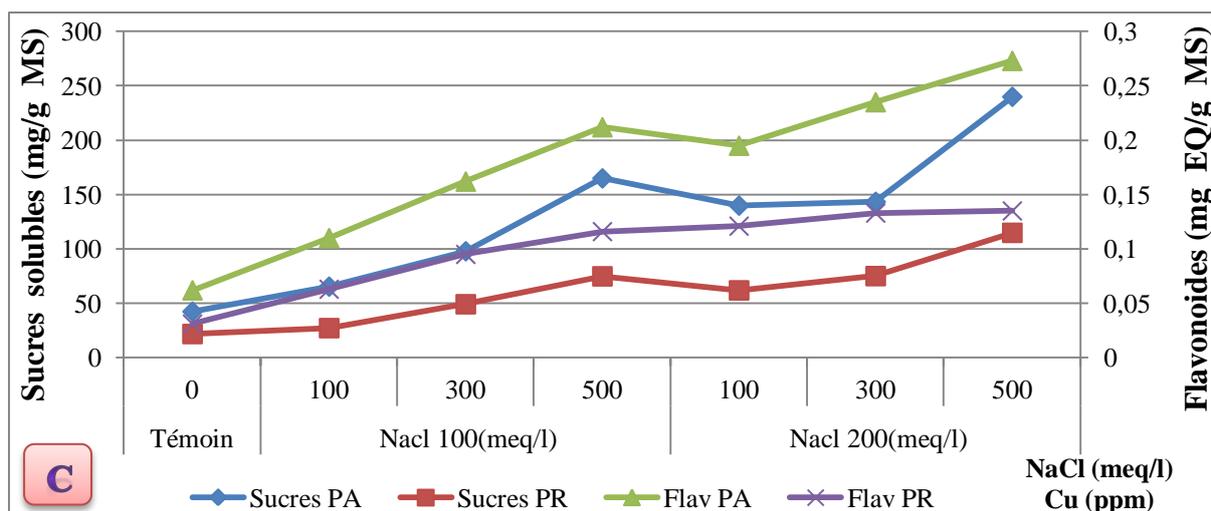


Figure 78 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les flavonoïdes de *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl-Cu.

2.7.5. Sous l'interaction NaCl-Zn

Les antioxydants sont corrélés positivement avec la proline (Figure.79 B, Figure.80 B) et les sucres solubles (Figure.79 C, Figure.80 C) dans les deux parties aérienne et racinaire du *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl-Zn (Tableau.66). Par contre, Le test de Pearson révèle une forte corrélation négative entre les antioxydants et les protéines totales (Figure.79 A, Figure.80 A).

Tableau 66 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les antioxydants du *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl-Zn.

		Polyphénols totaux		Flavonoïdes	
		PA	PR	PA	PR
Protéines totales	PA	-0,65	-0,55	-0,84	-0,77
	PR	-0,70	-0,66	-0,87	-0,82
Proline	PA	0,73	0,63	0,85	0,86
	PR	0,74	0,61	0,86	0,83
Sucres solubles	PA	0,53	0,32	0,69	0,61
	PR	0,61	0,41	0,72	0,72

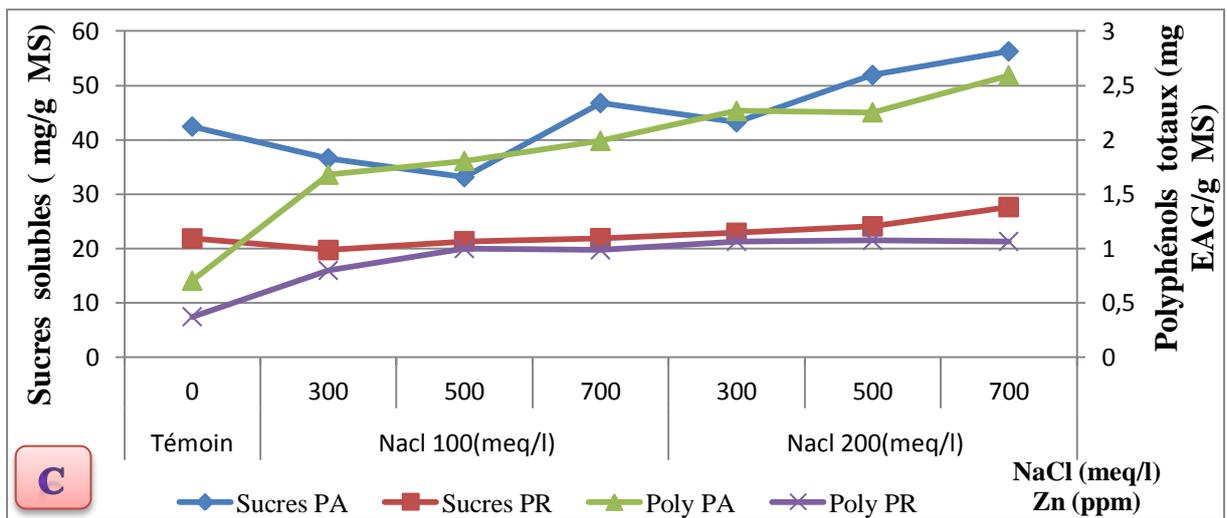
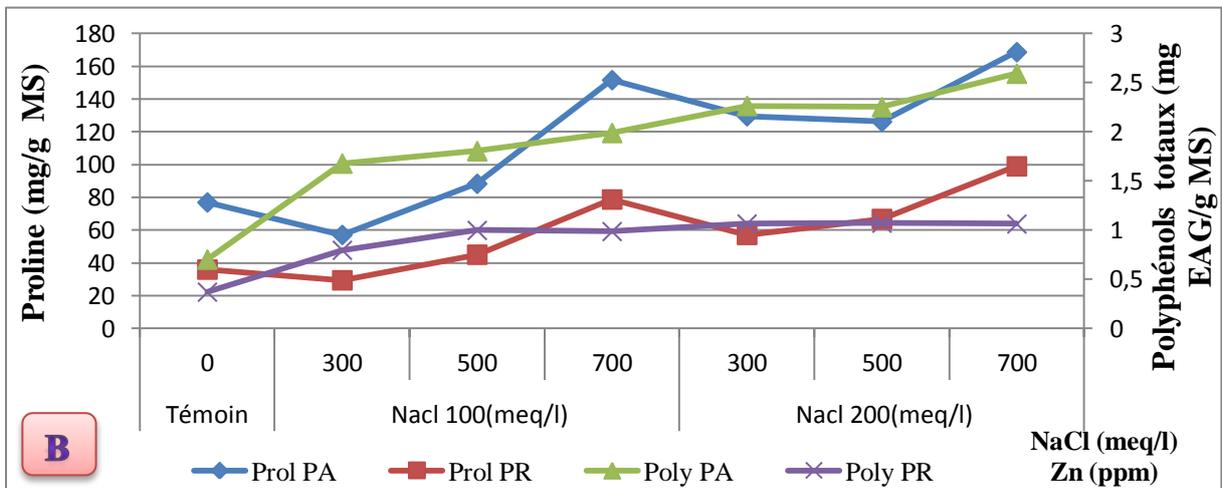
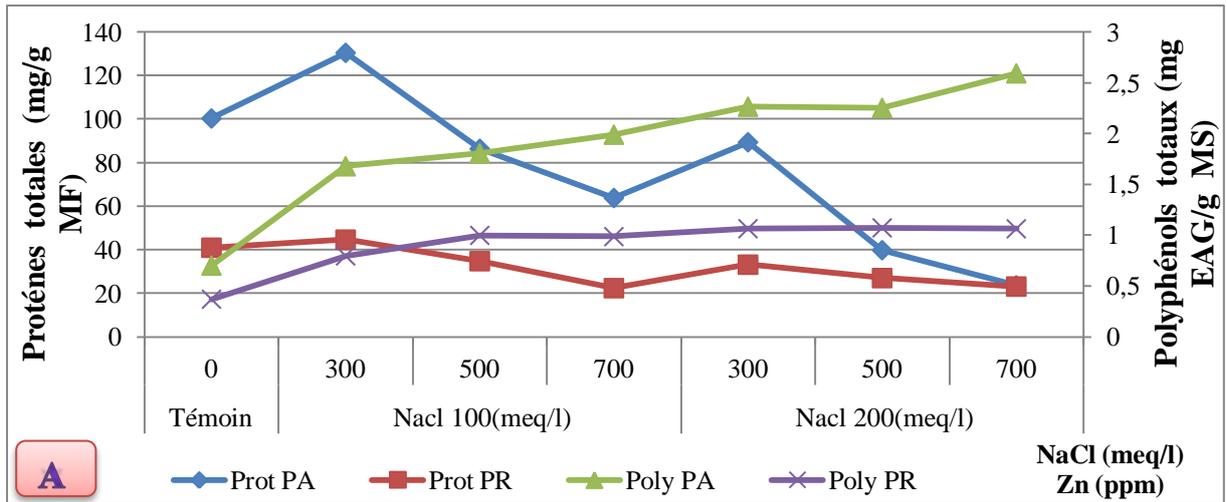


Figure 79 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les polyphénols totaux de *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl-Zn.

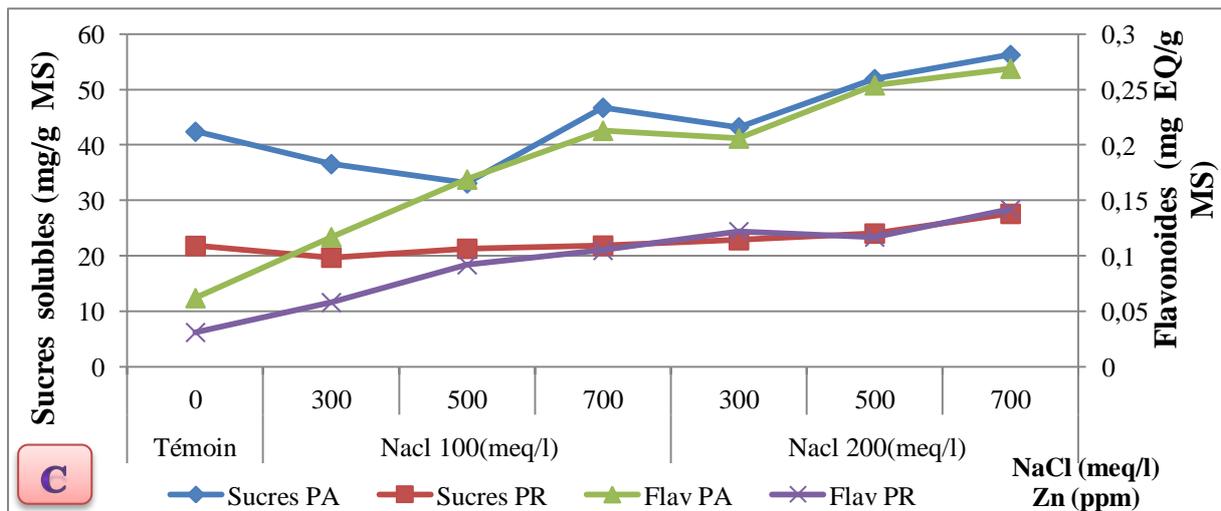
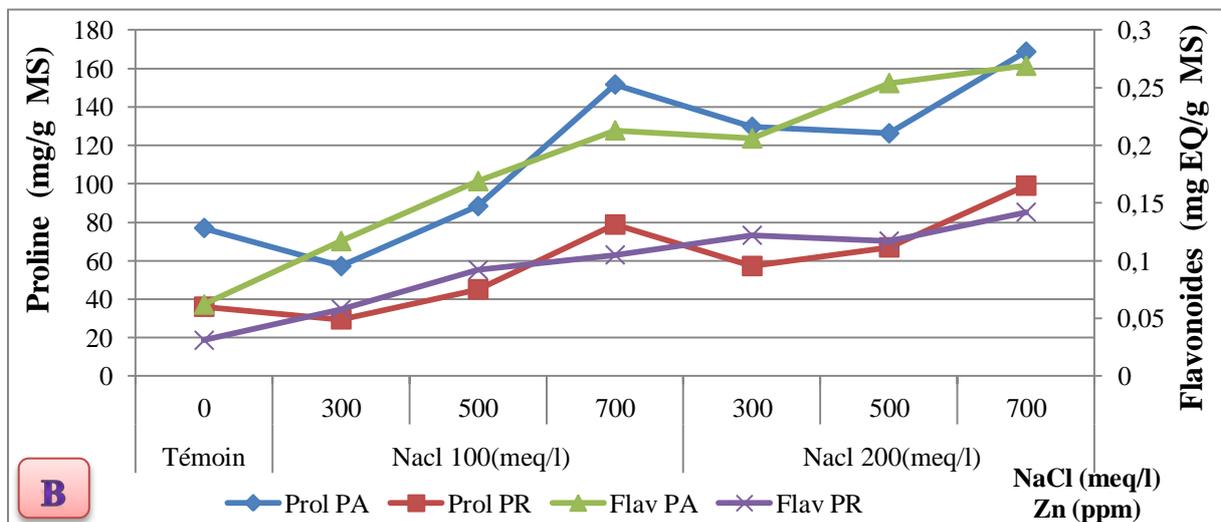
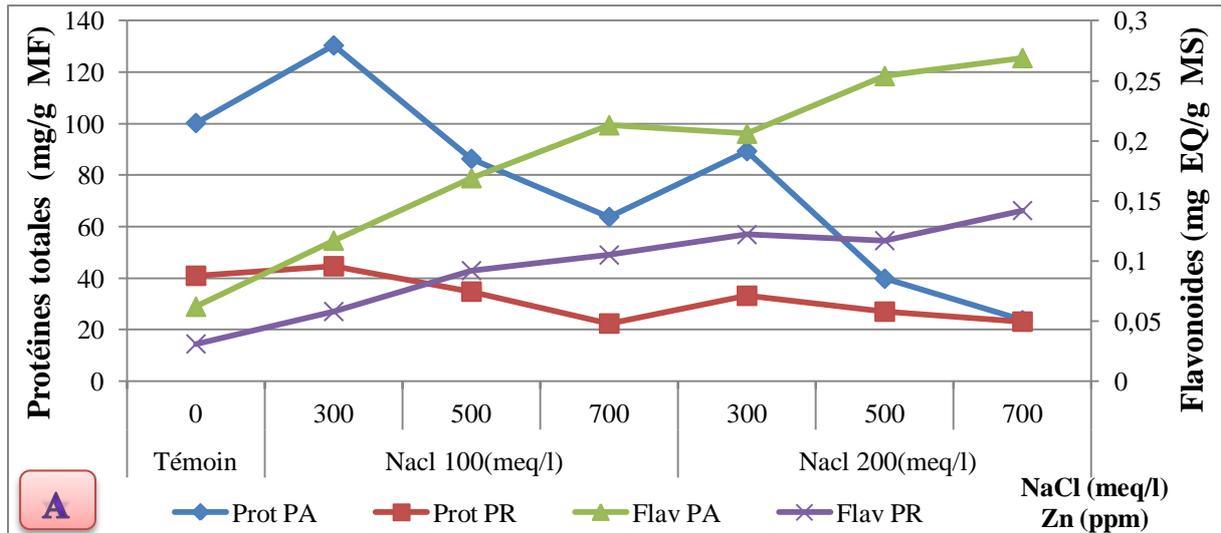


Figure 80 : Corrélation entre les osmorégulateurs et les flavonoïdes de *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl-Zn.

Chapitre VI

DISCUSSION

VI. Effet combiné de stress salin(NaCl) et métallique (Cu, Zn) sur la fève (*Vicia faba*.L.)

VI.1. Effet de NaCl, Cu et Zn sur les paramètres morfo-physiologiques

VI.1.1. Croissance en longueur des tiges et racines de la plante

Les résultats obtenus démontrent que l'application du cuivre et du zinc avec ou sans chlorure de sodium réduit nettement la morphogenèse des deux parties de la plante (aérienne et racinaire).

La réduction de croissance est généralement observée lorsque des plantes sont soumises à un stress (**Sobkowiak et Deckert (2003)**). Cette réduction peut être due à une diminution de l'absorption et la distribution d'éléments essentiels chez les plantes (**Ahmad et al., 2011 ; Hediji et al.,2015**), et /ou à l'inhibition de la division et de l'élongation cellulaire (**Seregin et Ivanov, 2001 ; Malkowski et al., 2002 ; Patra et al., 2004 ; Kopittke et al., 2007**).

Les résultats obtenus montrent une réduction importante de la longueur des tiges et racines des plantes stressées par le NaCl à 100 et 200 meq/l par rapport à la plante témoin. D'une façon générale, nous avons constaté que la croissance en longueur des tiges et des racines diminue avec l'augmentation de l'intensité du stress salin. Ces résultats sont similaires à la diminution de l'élongation des tiges et racines de *Phaseolus vulgaris* L. (**Tahri, 2018**), et de six espèces d'*Acacia* (**Cherifi, 2017**). Cet effet est fréquent chez les glycophytes (**Chartzoulakis et al., 2000**), où la diminution de la croissance de l'appareil végétatif observée peut être expliquée par une augmentation de la pression osmotique provoquée par le NaCl, ce qui bloque l'absorption de l'eau par les racines. Les plantes s'adaptent ainsi au stress salin par la réduction de leur croissance afin d'éviter les dommages causés par le sel (**Zhu et al., 2002**).

L'application du cuivre dans le sol diminue la hauteur de la plante *Vicia faba* L. en comparaison avec le témoin, ou on enregistre une réduction très importante à la dose de 500 ppm de cuivre. D'après **Kaplan (2010)**, la hauteur des plantes de la tomate a été affectée significativement par l'application de Cu au sol qui a causé un décroissement à des doses : 200, 500, 1000 et 2000 ppm.

De nombreux travaux font état d'une inhibition de la croissance et de la réduction d'élongation des tiges et longueur racinaire, après exposition par le cuivre qui est un oligoélément, et qui joue un rôle vital dans le maintien de métabolisme normal des plantes

supérieures. Cependant, le cuivre à des niveaux élevés devient fortement phytotoxique pour les cellules et cause l'inhibition de la croissance des plantes ou encore la mort (**Chen et al., 2005**).

D'après **Pahlsson (1989)**, le cuivre généralement atteint le développement racinaire par l'inhibition de la croissance des racines latérales et de l'initiation de la croissance des racines des jeunes plantes. L'inhibition de la croissance racinaire peut s'expliquer par les processus de lignification. Quand le Cu est en excès dans les cellules des racines la concentration en H₂O₂ et les quantités de peroxydases impliquées dans la synthèse de la lignine augmentent (**Lin et al., 2005**). L'augmentation de la lignine peut engendrer une diminution de l'accessibilité du Cu aux cellules (**Cuypers, 2000**). La lignine peut aussi se lier avec les polysaccharides des parois cellulaires, ce qui va les rigidifier et gêner la croissance des cellules (**Dos Santos et al., 2004**). l'excès de cuivre, stocké dans les vacuoles des cellules situées sous l'endoderme des racines pour limiter le transfert du cuivre vers les parties aériennes, peut provoquer des ruptures au niveau des racines qui sont alors coupées en deux (**Kopittke et al., 2011**). Ces modifications racinaires provoquent une altération de la perméabilité des membranes plasmiques, ce qui conduit à une perturbation généralisée de l'alimentation de la plante (**Kabata-Pendias, 2011**).

Les résultats trouvés pour les plantes stressées au Zinc à différentes concentrations (300, 500 et 700 ppm), révèlent une diminution de la hauteur de *Vicia faba* L.. La teneur la plus basse est obtenue à la dose de 700 ppm de Zinc.

Sous l'application de faibles concentrations de Zinc, l'amélioration du système racinaire a aidé les plantes à mieux absorber de l'eau et les autres nutriments dissous dans le sol et en effet a amélioré la croissance de différents organes et de la plante entière (**Reichman, 2002**). Le Zinc à des niveaux élevés peut inhiber la croissance racinaire. Selon **Khudsar (2004)**, le traitement par le Zinc a apporté presque une diminution significative de paramètres de croissance aux différents stades de développement des plantes d'*Artemisia annua*. Le Zinc a causé une réduction significative de la hauteur des plantes d'*Artemisia annua* encore à 50 et 100 ppm du sol. D'autres travaux ont signalé une diminution de la longueur des racines chez les plantes traitées avec le Zn, comme *Triticum aestivum* L. *Raphanus sativus* L. (**Pedler et al., 2004**). Des résultats similaires ont été observés chez *Populus sp.* attribuables à une toxicité du zinc (**Di Baccio et al., 2009**) qui a réduit l'allongement de la racine principale et a ralenti le développement des racines latérales (**Ren et al., 1993**).

La longueur des tiges et racines de *Vicia faba* L. diminue avec l'augmentation des doses de Cu-NaCl et Zn-NaCl appliquées à la plante. Ces résultats sont similaires à ceux rapportés par **Neggaz (2019)**, ou l'augmentation des doses de NaCl combinée avec (Cu et Zn) et provoque une réduction de la longueur des tiges et racines du radis.

VI.1.2. Nombre des feuilles

Les résultats de notre étude montrent que le nombre des feuilles de *Vicia faba* L. diminue en fonction de l'augmentation des doses salin et métalliques. Ces résultats sont en concordance avec des études précédentes documentent l'impact négatif des métaux lourds sur la morphologie de *Sesuvium portulacastrum* L. (La longueur des racines et des tiges, le nombre de feuilles, la surface foliaire et le poids sec des racines et des parties aériennes) qui est traité par 300 et 600 ppm de cuivre. Le nombre des feuilles de la plante de concombre ont diminué de manière significative (37%) lorsqu'ils ont été exposés à un excès de Cu (20 mg kg⁻¹ de sable) pendant 20 jours (**Alaoui-Sossé et al., 2004**). De plus, **benouis, (2012)** a signalé une diminution importante de nombre des feuilles chez la fève (Sidi Aïch et super aguadulce) sous l'effet de cuivre et surtout a la concentration de (400 mg/kg de sol).Également **Karataglis et Babalonas (1985)** ont reporté que le nombre de feuille diminue avec l'augmentation du concentrerions du Cu qui confirme nos résultats.

VI.1.3. Teneur relative en eau

Nous remarquons à travers cette étude que la teneur relative en eau constitue un indicateur intéressant, afin d'estimer l'état d'hydratation des plantes de la fève face aux contraintes abiotiques. Nos résultats montrent que les teneurs en eau diminuent dans les feuilles de la fève sous stress salin et métallique comparativement à la plante témoin.

L'effet du stress salin à 100 et 200 meq/l de NaCl se traduit par une diminution de la teneur relative en eau dans les feuilles de la plante, Cette diminution est enregistrée aussi chez *Raphanus sativus* (**Zourgui, 2012 et Neggaz ,2019**), *Abelmoschus esculentus* L. (**Rahim Guealia, 2019**), *Gossypium* et *Phaseolus vulgaris* (**Malick et al., 2012**). Dans une étude réalisée par **Kadri et midoun (2015)**, la teneur en eau des feuilles et tiges de *Medicago sativa* est également affectée par le NaCl.

Plusieurs études ont mis en évidence une perturbation hydrique des plantes traitées aux métaux lourds. Elles ont principalement relevé une diminution de la transpiration et une diminution de la teneur en eau. En plus ces perturbations du statut hydrique conduisent à la

fermeture des stomates qui va limiter les échanges gazeux avec l'atmosphère, et par conséquent les pertes d'eau par transpiration (**Azooz et al., 2011**).

Les résultats trouvés pour les plantes stressées au cuivre à différentes concentrations (100, 300, et 500 ppm), révèlent une diminution de la teneur en eau dans les feuilles de *Vicia faba* L. La teneur en eau la plus basse dans les feuilles de la plante est obtenue à la dose de 500 ppm de cuivre. Ces résultats sont conformes à ceux indiqués par (**Benouis, 2012 ; 2022**), il a observé une diminution des teneurs relative en eau en fonction de l'augmentation des doses de cuivre chez la fève (Sidi Aïch et super aguadulce).

La diminution de la teneur relative en eau sous l'effet du cuivre est signalée chez diverses cultures, **Mostofa et al.,(2015)**, ont révélé une réduction de la TRE chez le riz avec une synthèse intense de la proline, qui joue un rôle osmoprotecteur contre les perturbations osmotiques dans les cellules végétales causées par divers stress abiotiques, y compris le stress des métaux lourds. Sur la laitue, les travaux de **Shiyab (2018)**, ont montré une réduction de la TRE sous l'effet de stress de cuivre, cette réduction est due aux effets nocifs de cuivre sur la perméabilité de la membrane plasmique des cellules (**Ohsumi et al., 1988**). Sur le tournesol (*Helianthus annuus* L.), **Kastori et al.,(2008)** ont révélé une diminution de la transpiration et de la TRE (19%) avec une augmentation de la teneur en proline dans les feuilles sous l'effet du cuivre (10^{-6} M de Cu). la diminution de la teneur relative en eau indique que les concentrations excessives de cuivre ont réduit l'absorption et le transport de l'eau vers la partie aérienne de la plante (**Rucinska-Sobkowiak, 2016**).

Nos résultats montrent que la teneur en eau dans les feuilles de la fève diminue inversement proportionnelle avec la concentration de zinc. La teneur en eau la plus basse dans les feuilles est obtenue aux doses de 500 et 700 ppm. Ces résultats sont similaires à ceux rapportés par **Neggaz (2019)**, ou l'augmentation des doses de Zn, provoque une réduction de la teneur relative en eau du radis. **Aurélié (2009)** a expliqué que le stress métallique provoqué par le zinc réduit de manière importante la teneur en eau des cals des tissus de la plante entière de la tomate, la réduction est d'autant plus marquée que la concentration en métal dans le milieu est élevée.

VI.1.4. Poids frais et sec des parties aérienne et racinaire de la plante

L'étude de l'effet du NaCl sur le poids frais et sec des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. montre que l'application de cet élément conduit à une chute significative de la production de la biomasse totale de la plante. Le poids frais et sec diminue avec

l'accroissement des doses du NaCl appliquées, dont cette diminution est plus importante à la dose de 200meq/l. Ces résultats concordent avec ceux obtenus par **Cherifi (2017)**, qu'il a signalé une réduction de la biomasse chez six espèces d'*Acacia*. La réduction des biomasses aérienne et racinaire sous l'effet des fortes concentrations de sel a été rapportée aussi chez *Medicago sativa* par plusieurs auteurs (**Mezni et al., 2002 ; Ibriz et al., 2004**).

L'effet général de la salinité se traduit par la réduction de la biomasse (**Epron et al., 1999**). La diminution du taux de croissance des feuilles après une augmentation de la salinité du sol est principalement due à l'effet osmotique du sel autour des racines. En quelques heures, les cellules retrouvent leur volume et leur turgescence d'origine grâce à l'ajustement osmotique, mais malgré cela, les taux de la croissance cellulaire sont réduits (**Cramer, 2002 et Fricke et Peters, 2002**).

Chez des plantes poussant en milieu contaminé, les principaux symptômes sont des diminutions de biomasse aériennes et racinaires (**Lin et al., 2005**) mais les impacts sont plus importants au niveau des racines (**Paschke et Redente, 2002**).

Nos résultats montrent que le poids frais et sec des parties aérienne et racinaire de *Vicia faba* L. diminue inversement proportionnel avec les doses de cuivre appliquées. Nos résultats sont concordants avec les travaux de **Sonmez et al. (2006)**, qui ont montré que l'application du cuivre dans le sol conduit à la diminution de matière sèche des racines de la tomate. Les résultats de l'augmentation de l'application du Cu dans le sol sont ultérieurement reportés par **Sonmez (2007)**, et il indique que le poids sec des racines a été beaucoup plus faible que le poids sec des tiges et des feuilles de la plante, ce qui est en accord avec nos résultats.

Ces résultats obtenus sont en accord avec ceux de **Sun et al. (2010)**, qui ont également observé une inhibition de la croissance pondérale du radis traité par le cuivre.

Une contamination en Cu du sol entraîne une exposition des racines via la solution du sol et l'imprégnation en Cu du végétal induit une diminution de la biomasse aérienne des plantes d'autant plus importante que la contamination est élevée (**Vinit-Dunand et al., 2002**).

Dans notre expérimentation on a remarqué une nette diminution de la production de la biomasse totale de la plante signe visible de la toxicité du zinc en particulier à partir de la dose de 300 ppm. Ces résultats sont concordants avec ceux de **Khudsar (2004)**, où la masse sèche de la partie aérienne, racinaire et totale d'*Artemisia annua* diminue significativement avec le taux de zinc. Plusieurs études ont indiqué que la diminution de la croissance des plantes et du rendement des cultures dans des conditions de stress a été

associée à une diminution de l'absorption des nutriments et de l'eau, à un métabolisme anormal et à une inhibition de la synthèse des protéines végétales (**Pessarakli, 2001**).

Les résultats obtenus révèlent que le poids frais des parties aérienne et racinaire de la plante diminue inversement proportionnel avec l'application des doses de Cu-NaCl et Zn-NaCl par rapport au témoin. Cette diminution est plus importante à la dose de 200 meq/l de NaCl combinée avec 100,300 et 500 ppm de cuivre et 300,500 et 700 ppm de Zinc comparativement à la dose de 100 meq/l. Les présentes observations sont cohérentes avec **Neggaz, (2019)**, qui a remarqué que l'application des doses de NaCl (40 et 80 meq/l) combinées avec (400,800 et 1000 ppm) de cuivre et (200,300 et 400 ppm) de Zinc entraîne une réduction de biomasse totale du radis.

La réduction de la production de la matière sèche des plantes à des concentrations élevées des métaux lourds a été observée aussi par **Kalyanaraman et Sivagurunathan (1993)** (cadmium, cuivre et zinc) et **Vijayarengan (2012)** (zinc), et chez la tomate traitée par le cuivre (**Sonmez et al., 2006**), de nombreux travaux confirment que les métaux lourds augmentent la production de la matière sèche de différentes parties de la plante à des niveaux inférieurs (**Vijayarengan, 2012**). La toxicité du cuivre provoque un retard de croissance des racines, ce qui comprend un plus petit nombre de ramifications, une coloration foncée, un développement médiocre et moins d'épaississement (**Marques et al., 2019**).

VI.2.Effet de NaCl, Cu et Zn sur les paramètres biochimiques

VI.2.1. Chlorophylles

L'augmentation des doses de NaCl dans le substrat de culture du *Vicia faba L.* induit une diminution importante de la teneur en chlorophylle a, b et totale dans les feuilles de la plante. Ce résultat est confirmé par **Agastian et al., 2000** qui observent que le taux de la chlorophylle des feuilles diminue en général sous les conditions de stress salin et par des études précédentes de (**Mwai et al., 2004**) qui sont signalés que la salinité diminue considérablement la teneur en chlorophylle. Ceci s'accorde avec de nombreux travaux qui rapportent une diminution du contenu en chlorophylle sous l'effet du salinité chez *Brassica juncea* (**Qasim, 1998**), *Oryza sativa* (**Sultana et al., 1999**), *Triticum aestivum* (**Munns et James, 2003**), *Brassica oleracea* (**Bhattacharya et al., 2004**), *Avena sativa* (**Zhao et al., 2007**), *Hordeum vulgare* (**Jiang et al., 2006**), *Raphanus sativus* (**Zourgui, 2012**), *Capsicum*

annum L. (R'him *et al.*, 2013), *Medicago sativa* (Kadri et midoun, 2015), et *Abelmoschus esculentus* (Rahim Guealia, 2019), *Raphanus sativus* (Neggaz, 2019).

La salinité peut affecter la teneur en chlorophylle par son inhibition, ou une accélération de sa dégradation (Zhao *et al.*, 2007). De même selon Zid et Boukhris (1977), le stress salin peut induire une diminution de l'assimilation de l'azote au niveau des feuilles, probablement bloqué par le sel, par conséquent une réduction des pigments chlorophylliens. Il a été largement rapporté que la capacité photosynthétique du chloroplaste est diminuée en raison du stress salin, une des raisons pour lesquelles le stress salin entraîne l'instabilité des complexes protéiques pigmentaires, la destruction des chlorophylles et des changements dans la quantité et la composition des caroténoïdes (Dubey, 1997).

Les résultats du stress métallique sur la fève montrent une réduction importante de la teneur en chlorophylle de la plante sous l'effet de Cu et Zn. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Chugh et Sawhney (1999) et Li *et al.* (2003), qui ont montré l'effet de cuivre sur la photosynthèse chez *Elsholtzia splendens*, et ils rapportent également que ce métal à des concentrations faibles augmente le contenu de la chlorophylle, tandis que à des concentrations très élevées diminue la chlorophylle. L'application du cuivre chez la fève s'accompagne d'une nette diminution des teneurs en pigments photosynthétiques, ou ces réductions sont très affectées par la toxicité du cuivre et elles deviennent significatives à partir de la dose 400 ppm de Cu (Benouis, 2022).

Le Cu serait responsable d'une inhibition de la photosynthèse par la peroxydation des lipides des membranes des thylakoïdes, le blocage de l'activité de la ribulose 1-5-biphosphate carboxylase-oxygénase (Vinit-Dunand *et al.*, 2002), de la synthèse de la chlorophylle, et en interférant au niveau des photosystèmes (Cuypers, 2000). Il y a diminution des contenus en chlorophylle totale, a et b (Chatterjee, 2000 ; Demirevska-Kepova *et al.*, 2004). Cependant des augmentations de chlorophylle dans les feuilles sont aussi observées (Cook *et al.*, 1997) et seraient dues à une concentration des métabolites cellulaires suite à l'inhibition de l'expansion cellulaire par le Cu (Bessoule et Mench, 2002).

Nazir *et al.*, (2019) ont signalé une diminution importante de contenu en pigments photosynthétiques chez *Solanum lycopersicum* L. (à la dose 100 ppm de Cu pendant 40 jours).

Gong *et al.*, (2019) ont rapporté également que l'application de différentes doses de cuivre (100 à 1000 mg/l) a provoqué des diminutions des teneurs en chlorophylle a (42%) et en chlorophylle b (64%) dans les feuilles de l'épinard.

L'excès du Zn a réduit significativement la synthèse de la chlorophylle **a**, **b** et **totale** chez la fève par rapport aux témoins, ce qui confirme les résultats de **Moustakas et al., (1997)** et **Singh et al., (2004)**, qui rapportent une dégénération fréquente de la quantité de chlorophylle chez les plantes exposés à différentes concentrations du métaux lourds. Une telle réduction a été attribuée à une inhibition de la voie de biosynthèse de la chlorophylle et (ou) à la formation d'une enzyme protéolytique, responsable de la dégradation des chloroplastes (**Ouni et al., 2016**). Également, l'excès de Zn peut engendrer une carence induite en magnésium et (ou) en fer (**Sivasankar et al., 2012**), Outre la fermeture des stomates, ce retard est attribuable principalement à une baisse de l'efficacité photochimique du photosystème II (**Sidhu et al., 2017**) et (ou) à une limitation de la capacité biochimique de carboxylation (**Islam et al., 2008**). Des études similaires ont montré que la teneur en chlorophylle est réduite sous l'effet du Zn chez *Arabidopsis* (**Wang et al., 2015**).

Les résultats de notre étude ont démontré que la teneur en chlorophylle diminue avec l'augmentation de la concentration de NaCl-Cu et NaCl-Zn dans le milieu de culture. Ces résultats sont en accord avec ceux de **Neggaz (2019)**, où la teneur en chlorophylle diminue sous l'effet de l'interaction de la salinité avec le Cu, Zn et le Pb chez le radis.

Auparavant, plusieurs chercheurs ont indiqué que la toxicité des métaux est souvent associée à une croissance racinaire restreinte qui affecte l'absorption des nutriments et entraîne une chlorose et un retard de croissance (**Rashid et al., 2016 ; Shweti et al., 2016**).

La diminution du taux de chlorophylle chez les plantes exposées aux métaux lourds est un phénomène très courant et supposé comme étant préliminaire à l'inhibition de la photosynthèse (**Prasad, 1999**). Le cuivre semble affecter plus la biosynthèse des chlorophylles que le cadmium chez *Lemna trisulca* (**Prasad et al., 2001**) et *Chlamydomonas reinhardtii* (**Prasad et al., 1998**) qui lui-même semble avoir plus d'effets que le plomb chez *Triticum aestivum* (**Oncel et al., 2000**).

Ainsi, La diminution de la photosynthèse peut être due à une inhibition de la synthèse des chlorophylles par blocage des ions Mg, Mn et Fe (**Chatterjee et al., 2004 ; Gopal et Rizvi, 2008**), ou par l'augmentation de l'activité de la chlorophyllase (**Drazkiewicz, 1994 ; Liu et al., 2008**), ou encore, la destruction des chloroplastes (**Sharma et Dubey, 2005**).

VI.2.2. Proline

La teneur en proline dans les feuilles et racines chez *Vicia faba* L. augmente proportionnellement avec la concentration de NaCl, Cu et Zn. Cette accumulation est plus

importante au niveau de la partie aérienne par rapport à la partie racinaire, ce qui pourrait expliquer la synthèse de cet acide aminé au niveau des feuilles et puis sa migration vers les racines (**Djerroudi-Zidane et al., 2010**). La proline augmente significativement pendant diverses conditions de stress abiotique et est bien connue pour son rôle dans le mécanisme de réponse adaptative vers la tolérance au stress abiotique (**Chun et al., 2018 ; Kumchai et al., 2013 ; Liang et al., 2013**).

La culture de la plante du *Vicia faba* L. dans un milieu salin provoque une accumulation de la proline dans les feuilles et les racines de cette plante, dont la teneur en proline augmente en fonction de l'accroissement des doses du NaCl appliquées. Ces résultats concordent avec plusieurs travaux signalant l'augmentation de la proline sous stress salin chez plusieurs espèces à savoir *Citrus aurantium* (**Atmane et al., 2003**), *Cathanathus roseus* (**Cheruth, 2007**), *Atriplex halimus* (**Boukraâ, 2008**), *Brassica juncea* (**Mittal et al., 2012**), *Portulaca aleraceae* (**Rahdari et al., 2012**), *Trifolium repens* (**Ben Khaled et al., 2003**), et *Phaseolus vulgaris* (**Tahri, 2018**). La forte accumulation de la proline dans les plantes stressées par le sel pourrait être le résultat d'une diminution de son oxydation et/ou d'une réduction de son utilisation dans la synthèse protéique (**Trinchant et al., 2004**). De même une hydrolyse des protéines riches en proline et/ou une synthèse activée de cet acide aminé aboutiraient à son accumulation dans les cellules (**Ben Khaled et al., 2003**). Selon **Hassani et al. (2008)**, cette accumulation permet la protection de la membrane cellulaire et participe à l'ajustement osmotique, chélation et détoxification des métaux, protection des enzymes, régulation de l'acidité cytosolique, stabilisation de la machinerie de la synthèse protéique et piégeage des espèces réactives de l'oxygène (**Sharmila et Pardha Saradhi, 2002**).

Les résultats montrent que l'accumulation de la proline chez la fève est corrélée positivement avec l'accroissement des doses du Cu et Zn appliquées. Ces résultats sont concordants avec les travaux de **Chai et al., (2014)** réalisés sur les plantes de *Spartina alterniflora* qui ont montré une augmentation de la teneur en proline dans les feuilles des plantes exposées aux 800 et 1000 mg Cu/kg du sol, de même **Noreen et al. (2018)** a obtenu une augmentation de la proline (**72,9%**) sous l'action du cuivre chez le blé (*Triticum aestivum* L.). **Benouis (2022)** a montré que l'exposition du *Vicia faba* L. au cuivre conduit à l'accumulation de la proline, ou cette accumulation est significative à partir de la dose 400 ppm de cuivre.

Une telle augmentation de la proline a également été observée sous l'effet d'autres métaux tels que le Zn, le Pb, le Cd et le Cu chez le tournesol (**Kastori et al., 1992**), le Cd et le

Pb chez *Lemna polyrrhiza* L. (John *et al.*, 2008), le Cd chez *Atriplex halimus* subsp (Bouziid, 2009) et chez *Brassica juncea* (Irfan *et al.*, 2014). le Cu, Zn, Pb et Cd chez l'*Atriplex canescens* (Khedim, 2019).

Azooze *et al.*, (2012) ont également obtenus une augmentation jusqu'à 190% de la teneur en proline chez le blé à la dose de 20µM (50 ppm) de cuivre dans le sol. L'accumulation de la proline est signalée chez *Medicago truncatula* (Filippou *et al.*, 2013), chez *Oryza sativa* (riz) (Mostofa *et al.*, 2015) chez *Coffea arabica* et *Canavalia ensiformis* (Andrade *et al.*, 2010) et chez *Solanum nigrum* (Khateeb et Al-Qwasemeh, 2014).

Le taux de la proline dans les feuilles et racines de la fève augmente proportionnellement avec les doses de l'interaction Cu-NaCl et Zn-NaCl appliquées à la plante. On signale que La fève synthétise plus de proline au niveau des parties aériennes et racinaires dans un milieu de culture contaminé aux métaux lourds en présence de NaCl ce qui explique que l'intensité de stress métallique (cuivre et zinc) est plus importante en présence de NaCl.

Globalement, les espèces qui se sont montrés les plus sensibles au stress, réagissent en accumulant plus rapidement de la proline. Par contre, celles qui se sont montrées tolérantes, présentent une stabilité relative ou une faible accumulation de leur teneur en proline (Lemziri *et al.*, 2007).

VI.2.3. Sucres solubles

Les résultats obtenus montrent que la teneur des sucres solubles chez la plante du *Vicia faba* L. augmente avec l'augmentation des doses du NaCl, Cu et Zn appliquées. Cette augmentation est plus importante dans les feuilles comparativement aux racines de la plante. Ces résultats sont concordants avec ceux de Hajhashemi *et al.* (2006), où l'accumulation des sucres solubles observés au niveau foliaire est parmi les phénomènes les plus observés dans la réponse au stress.

Nos résultats montrent que le stress salin provoque une accumulation des sucres solubles. Ces résultats concordent avec ceux enregistrés chez les feuilles de *Solanum lycopersicum* (Khavarinejad et Mostofi 1998), les feuilles de *Bruguiera parviflora* (Parida *et al.*, 2002), *Cucurbita pepo* (Ialelou *et al.*, 2013), *Trifolium repens* (Ben Khaled *et al.*, 2003), *Citrus aurantium* (Atmane *et al.*, 2003), *Medicago sativa* (Kadri et Midoun, 2015), et certains génotypes du riz (Alamgir et Ali 1999), dont une augmentation des sucres solubles

est enregistrée en fonction de l'élévation des doses salines. D'après **Ialelou et al., (2013)**, l'augmentation des sucres a été liée à la dégradation de l'amidon, par ailleurs **Subba et al., (2014)**, justifient cette augmentation par la perturbation de l'activité photosynthétique qui pourrait modifier le métabolisme des sucres. Il a été démontré que la salinité augmente les concentrations de sucres solubles, et les métaux lourds généralement conduisent à une diminution de celui-ci (**Rosa et al., 2009**). L'effet des concentrations salines utilisées a pu être compensé par l'accumulation de sucres solubles au niveau foliaire, ce qui pourrait indiquer un indice de tolérance à la salinité (**Ait Haddou et al., 2002**).

Les teneurs en sucres solubles sont élevées dans les feuilles et racines de *Vicia faba* L. sous stress métallique (Cu et Zn) comparativement à la plante témoin. Ce résultat est similaire à ceux obtenus par **Benouis, (2022)**, dont la teneur en sucres solubles enregistrée chez les feuilles de la fève est supérieure à celle enregistrée chez les racines de la plante avec une accumulation significative en sucres solubles à partir de la dose 400 ppm de cuivre, et **Neggaz, (2019)**, où la teneur en sucres solubles de *Raphanus sativus* L. a été accumulée dans ces deux parties aérienne et racinaire sous l'action de Zn.

La fluctuation du niveau des sucres solubles dans les feuilles chez les plantes de *Vicia faba* L. stressées par les métaux montre une accumulation progressive avec l'augmentation des doses appliquées, et une différence marquée entre les deux métaux ou les plantes stressées par le zinc accumule un taux plus des sucres solubles que les plantes recevant le cuivre en particulier à la dose 700 ppm de zinc.

Il existe également des études montrant que certaines concentrations de Zn provoquent une augmentation des sucres solubles dans les feuilles des plantes (**Bibbiani, 2017**).

L'accumulation des sucres solubles dans la plante stressée aux métaux lourds (cuivre et zinc) est une réponse au stress métallique contrairement à la plante non stressée où le taux des sucres solubles est faible, car selon **Bouzoubaa et al. (2001)**, L'accumulation des sucres solubles pourrait avoir un rôle osmotique empêchant la déshydratation des cellules et le maintien de la balance de la force osmotique pour garder la turgescence et le volume cytosolique aussi élevés que possible. **Moustakas (2012)** ont rapporté une accumulation et une interaction d'une augmentation de la proline et des sucres solubles maintenant une protection antioxydante élevée dans les feuilles des plantes soumises à un stress métallique.

Alaoui-Sossé et al. (2004) ont montré que l'exposition du concombre au cuivre conduit

à l'accumulation des sucres solubles dans les feuilles, l'inhibition de la croissance diminue l'exportation des glucides des feuilles, ce qui entraîne une accumulation d'amidon et de saccharose et une inhibition en retour de la photosynthèse (**Vinit-Dunand et al., 2002**).

Nos résultats montrent que les sucres solubles sont accumulés dans les différentes parties du *Vicia faba* L. sous l'interaction NaCl-Cu et NaCl-Zn. Ces résultats sont concordants avec ceux de **Neggaz (2019)**, a enregistré une accumulation des sucres chez le radis sous stress salin combiné avec des métaux lourds (Cu et Zn).

Les cellules végétales accumulent activement certains solutés solubles, tels que les sucres solubles, ce qui vise à réduire le potentiel osmotique intracellulaire pour assurer l'approvisionnement normal en eau dans des conditions de stress aux métaux lourds et maintenir les fonctions physiologiques normales des cellules (**Jia et al., 2012**).

Des recherches récentes ont montré que l'augmentation des sucres solubles dans les tissus des végétaux est considérée comme un aspect d'adaptation aux stress abiotiques (**Rosa et al., 2009**), car ils ont un rôle dans le maintien de la turgescence cellulaire et à protéger les membranes cellulaires contre le stress oxydatif (**Rodriguez et al., 2015**) ainsi, la protection des chlorophylles et des caroténoïdes contre l'agressivité du stress métallique (**Azouz et al., 2011**).

VI.2.4. Protéines

Les résultats obtenus montrent que les teneurs en protéines enregistrées chez la fève diminuent dans les parties aérienne et racinaire en fonction de l'intensité des doses de (NaCl, Cu et Zn) appliquées dans le substrat. Cette diminution est due probablement à modification de l'expression génique (**Kovalchuk et al., 2005**) et augmentation de l'activité ribonucléasique (**Gopalet Rizvi, 2008**) ; Stimulation de l'activité protéasique (**Jana et Choudhuri, 1982 ; Gupta et al., 2009**) ; Diminution de la teneur en acides aminés libres (**Xiong et al., 2006 ; Gupta et al., 2009**), corrélée à une forte perturbation du métabolisme de l'azote (**Chatterjee et al., 2004**).

Les protéines sont des biomolécules jouant un rôle actif et vital dans le fonctionnement des cellules, tel que : transporteurs, hormones, enzymes...Elles sont particulièrement sensibles à l'action des ROS. Les ROS sont aussi capables de couper les liaisons peptidiques et de former ainsi des fragments protéiques (**Kocchlin-Ramonatxo, 2006**).

L'application des doses croissantes du NaCl dans le milieu de culture de la plante du *Vicia faba* L. provoque une diminution importante de la teneur en protéines au niveau de la partie aérienne et racinaire de la plante. Ces résultats sont en accord avec les résultats obtenus par de nombreux travaux qui signalent la diminution des taux de protéines sous stress salin chez *Vicia faba* (Gadallah, 1999), *Oryza sativa* (Jamil et al., 2012), *Amaranthus tricolor* (Wang et Nil, 2000), *Bruguiera parviflora* (Parida et al., 2002), *Pancratium maritimum* (Khedr et al., 2003), *Beta vulgaris* (Jamil et al., 2012), *Portulaca oleraceae* (Rahdari et al., 2012), *Phaseolus vulgaris* (Haricot rouge) (Saad, 1997), *Brassica juncea* (Mittal et al., 2012), *Medicago sativa* (Dubey, 1999), et *Phaseolus vulgaris* (Haricot vert) (Pessarakli, 1999).

Pessarakli et Tucker (1985) ont signalé une diminution de la teneur en azote protéique des plantes de *Gossypium hirsutum* sous stress salin. Plusieurs autres chercheurs ont également signalé une altération du métabolisme de l'azote et une diminution de la teneur en protéines d'un certain nombre de plantes dans des conditions de stress (Helal et Mengel., 1979). Dubey (1999) a examiné le métabolisme modifié de l'azote et la synthèse protéique, respectivement, dans des conditions stressantes, ce dernier a signalé que le métabolisme de l'azote et la synthèse des protéines chez les espèces végétales étaient gravement affectés par le stress salin,

les protéines jouent un rôle important dans tous les systèmes vivants (Basile et al., 2013). Tout changement physiologique ou biochimique, qu'il soit négatif ou positif, se fera par altération de l'activité des protéines. (Xiang et al., 2014). Sous stress salin, une cause importante d'endommagement qui perturbe la synthèse des protéines est la concentration élevée de Na⁺. Cet ion peut dérégler les processus métaboliques en entrant en compétition avec K⁺ pour sa fixation sur des enzymes et des protéines importantes. Par ailleurs, K⁺ est vital pour la synthèse de certaines protéines (Tester et Davenport, 2003).

Nos résultats montrent une diminution significative des taux de protéines en fonction de l'accroissement des doses de Cu et Zn appliquées dans le substrat de culture de la fève, On signale aussi que les plantes traitées par le cuivre sont moins riches en protéines que celles traitées par le zinc, en particulier à la dose 300 ppm de zinc, où on a enregistré une accumulation très importante en protéines comparativement au témoin. Des études similaires publiées récemment par Mishra et al. (2006), confirment également la pertinence des résultats que nous avons obtenus puisqu'ils enregistrent une augmentation de la teneur en protéines dans les feuilles des plantes stressées à 2500 ppm de zinc par rapport au témoin.

L'augmentation des protéines solubles totales sous stress de Zn peut être considérée comme un mécanisme de tolérance des plantes, c'est-à-dire que la synthèse des protéines de stress qui participent à la détoxification cellulaire a été induite sous stress (**Sabatini et al., 2009**). Il a été démontré que les plantes peuvent résister à la toxicité des métaux lourds en augmentant la teneur en protéines solubles (**Noctor, 2006**). L'augmentation de ces derniers peut augmenter la perméabilité cellulaire et le nombre de protéines fonctionnelles, ce qui permet de maintenir le métabolisme normal des cellules (**Jing Hou et al., 2018**).

Ces résultats sont concordants avec ceux des travaux de **Abdel-Wahab et al., (2019)** qui ont démontré que chez les plantes *Solanum nigrum* L. exposées aux 150 et 200 mg/l de cuivre, la diminution de la teneur en protéines atteint respectivement à 19 et 52%. En outre, Les résultats obtenus par **Liu et al., (2016)**, ont montré aussi une diminution de 15 % de la teneur en protéines sous l'effet du cuivre (50 mg/kg de Cu pendant 60 jours) chez *Catharanthus roseus* L. (plante médicinale). Les résultats obtenus par **Liu et al., (2016)**, ont montré une diminution de 15 % de la teneur en protéines sous l'effet du cuivre (50 mg/kg de Cu pendant 60 jours) chez *Catharanthus roseus* L. (plante médicinale).

Le taux des protéines dans la plante a diminué significativement dans les feuilles et les racines des plantes de *Vicia faba* L. sous les concentrations du Cu (100,300 et 500 ppm) ou de Zn (300,500 et 700 ppm) combiné à la salinité surtout à 200meq.l⁻¹ où la diminution est plus apparue par rapport aux plantes stressées avec le Cu ou le Zn seul.

Les protéines sont les principales cibles des métaux lourds. Soit ils forment un complexe avec des chaînes latérales fonctionnelles de protéines, soit ils déplacent les ions essentiels des métalloprotéines, entraînant une altération des fonctions physiologiques (**Tamás et al., 2014**). De plus, les métaux lourds interfèrent avec les conformations natives des protéines en inhibant le processus de repliement des protéines naissantes ou non natives en provoquant une déficience quantitative des protéines affectées et par la formation d'agrégats protéotoxiques (**Bierkens, 2000 ; Tamás et al., 2014**). De plus, le stress dû au cuivre provoque également une production accrue de ROS, ce qui entraîne une détérioration des macromolécules des plantes, notamment les protéines (**Sirhindi et al., 2015**).

VI.2.5. Les antioxydants

Les résultats montrent que l'accumulation des polyphénols totaux et des flavonoïdes dans les deux parties aérienne et racinaire du *Vicia faba* L. est corrélée positivement avec

l'accroissement des doses de Cu et Zn appliquées, Ces résultats sont concordants avec ceux de **Sgherri et al. (2007)**, où il a observé une augmentation des polyphénols sous l'effet du stress métalliques chez *Vicia faba* L, **Neggaz (2019)** chez *Raphanus sativus* , où elle a observé une augmentation en polyphénols et en flavonoïdes dans les feuilles et les racines des plantes du radis stressée par (Cu, Zn, Pb) **Khedim (2019)** chez *Atriplex canescens* stressée par des métaux lourds (Cu, Zn, Pb, Cd), , **Rastgoo et al. (2011)** chez *Aeluropus littoralis* sous l'effet des métaux lourds (Pb, Co, Cd, Ag), **Kisa et al. (2016)**, où il a observé une augmentation des polyphénols sous l'effet du stress de cuivre chez *Zea mays*. **Benouis (2022)** qui a signalé une augmentation en polyphénols totaux et en flavonoïdes dans les feuilles des plantes de *Vicia faba* L. qui sont significatives à partir de la dose 400 ppm de cuivre, et elles atteignent leur maximum aux doses de 800 et 1000 ppm de cuivre, Une augmentation de la teneur en polyphénols est marquée aussi chez *Vicia faba* soumis à différentes concentrations de Hg (**Benahmed ,2010**). Les composés phénoliques interviennent dans de nombreux mécanismes pour permettre à la plante de s'adapter à son milieu (**Macheix et al., 2005**).

L'accumulation de polyphénols au niveau des plantes exposées directement aux différents stress est expliquée par la stimulation de la production de la polyphénol-oxydase qui est une enzyme clé de la voie métabolique conduisant à la formation des polyphénols (**Levent-Tuna et al., 2008**).

Selon **Macheix et al. (2005)**, l'accumulation des polyphénols pourrait avoir un rôle essentiel dans l'équilibre et l'adaptation de la plante. Les polyphénols sont capables de prévenir la peroxydation des lipides membranaires et de capter les radicaux hydroxyles, superoxyde et peroxydes (**Hu et al.,2005**). La suppression de la formation des ERO par inhibition de quelques enzymes ou par chélation des ions métalliques, impliqués dans leur production, La protection des systèmes de défense antioxydants de l'organisme (**Boudiaf, 2006**).

En effet, les polyphénols possèdent des groupes hydroxy phénoliques dans leurs structures et les propriétés antioxydants sont attribuées en partie, à la capacité de ces composés naturels à piéger les radicaux libres tels que les radicaux hydroxyles (OH°) et superoxydes (O2°) (**Bartosz, 2003**).

Les flavonoïdes interviennent en tant que molécules antioxydantes qui assurent la fixation des ERO (**Lovdal et al., 2010**). Ces derniers sont considérés par **Morris (1995)** comme des bons chélateurs de métaux lourds. Il a été observé que les gènes responsables de la

biosynthèse des flavonoïdes sont également induits par le stress (**Winkel-Shirley, 2002 ; Gill et Tuteja, 2010**).

Les résultats obtenus sur l'accumulation des flavonoïdes dans la plante stressée corroborent avec ceux de **Walton et Brown (1999)**, qui lient les quantités accumulées des flavonoïdes à la tolérance aux stress, concordant ainsi avec une étude faite par **Morris (1995)**, montrant que les flavonoïdes sont de bons chélateurs de métaux lourds.

D'autres études ont montré que le stress au Cu (50 ,100 et 200 mg.L⁻¹ de CuCl₂) augmente significativement les teneurs en flavonoïdes chez *Belamcanda chinensis*, cette augmentation est proportionnelle avec le temps (7, 14, 21, 28, 35 et 42 jours). **Amri et al., (2017)** ont détecté des augmentations significatives des teneurs en flavonoïdes et polyphénols chez *Marrubium vulgare* avec l'augmentation des doses de cuivre (200 et 300 mg/l).

les métaux lourds, peuvent intensifier les processus de production d'ERO conduisant au stress oxydatif (**Sytar et al., 2013**). Devant cette perturbation, l'accumulation de substances phénoliques tels que les polyphénols et les flavonoïdes, dans les tissus végétaux est considérée comme une mécanismes de défense contre le stress oxydatif (**Ahanger et al., 2020**). Les composés phénoliques sont des molécules biologiques actives possédants un ou plusieurs cycles benzéniques portant un ou plusieurs fonctions hydroxyles (**Dar et al., 2017**).

Nos résultats montrent que l'exposition des plantes de *Vicia faba* L. à des concentrations salin et métalliques a entraîné une accumulation importante des polyphénols totaux et des flavonoïdes.

Les polyphénols sont accumulés significativement dans les différentes parties des plantes de *Vicia faba* L. sous la pression des concentrations du (Cu/ Zn) combiné à la salinité surtout à 200meq/l de NaCl où l'augmentation est plus apparue par rapport aux plantes stressées avec le Cu ou le Zn seul. Le stress salin limite la photosynthèse, ce qui entraîne une production excessive d'ERO. Pour s'adapter à ces conditions environnementales nocives, les plantes induisent la synthèse de divers métabolites secondaires, tels que les composés phénoliques (**Waśkiewicz et al., 2013**) Ainsi, dans certaines études, il n'est pas totalement prouvé que l'accumulation des composés phénoliques pour les plantes stressées résulte effectivement d'une augmentation de la synthèse des métabolites, elle peut être dû à une augmentation supposée de la concentration qui est un effet de la réduction de la biomasse végétale (**Khan et al., 2011**).

VI.2.6. Relation entre osmorégulateurs et antioxydants

Les résultats obtenus révèlent une corrélation entre l'augmentation de la teneur en polyphénols et flavonoïdes et la diminution de la teneur en protéines dans les deux parties aérienne et racinaire du *Vicia faba* L. sous l'effet de NaCl, Cu, Zn, NaCl-Cu et NaCl-Zn. Cette corrélation est expliquée par l'effet néfaste de NaCl et les métaux lourds (Cu et Zn) sur la plante par la formation des ERO qui ont réduit la teneur en protéines en synthétisant des quantités importantes en polyphénols pour faire face à ce stress oxydatif.

L'augmentation de la teneur en polyphénols et flavonoïdes dans les deux parties aérienne et racinaire du *Vicia faba* L. est corrélée avec l'augmentation de la teneur en proline et sucres solubles sous l'effet du stress salin et métalliques. Ces résultats montrent que l'augmentation de la teneur en proline indique que la plante est dans un état stressant, par conséquent, elle a accumulée des quantités importantes en polyphénols et en flavonoïdes afin de réagir au stress et réduire ses effets néfastes. Cette augmentation indique que le stress appliqué à la plante développe plusieurs mécanismes de défense telle que l'augmentation de la teneur en antioxydants et en osmorégulateurs.

Conclusion générale

Conclusion générale

La salinisation et la contamination des sols agricoles par les métaux lourds devraient être parmi les problèmes environnementaux les plus critiques actuellement, pour cela notre objectif était d'étudier la capacité de *Vicia faba* L. à croître dans des milieux salin et pollué avec des doses croissantes en (Cu et Zn) et d'évaluer ces effets sur les paramètres morpho-physiologiques et biochimiques de cette plante.

Les principaux résultats obtenus :

- Les stress abiotiques (salin et métalliques) provoquent des réductions importantes des paramètres morpho-physiologiques de la fève, se traduisent par une baisse significative de la longueur des tiges et racines, nombre des feuilles, la biomasse végétale, et la teneur relative en eau.
- L'augmentation des doses du (NaCl, Cu et Zn) dans le milieu de culture de la plante de *Vicia faba* L. provoque une réduction du taux de la photosynthèse, ceci est due à une inhibition de la synthèse de la chlorophylle dans leurs feuilles et également une réduction de la teneur en protéines au niveau de leurs parties végétatives (aérienne et racinaire). Toutes ces modifications observées pourraient être prises comme biomarqueurs de toxicité des métaux lourds et de NaCl sur la plante.
- Sous l'effet de la salinité et des métaux lourds (Cu/Zn), les plantes de *Vicia faba* L. ont accumulé certains osmorégulateurs dont la proline et les sucres solubles et les antioxydants (polyphénols, flavonoïdes) au niveau foliaire et racinaires des plantes qui ont un rôle dans la tolérance des plantes au stress.
- Les différents paramètres testés sur *Vicia faba* L. ont permis de montrer que les trois contaminants laissent des effets très toxiques, au-dessous de certains seuils. Ces seuils sont à partir de 100 ppm de cuivre, 500 ppm de zinc et 100 meq de NaCl.
- L'interaction (salinité-métaux lourds) montre que l'intensité de toxicité des métaux lourds est plus importante en présence de NaCl.
- La fève présente un ordre de sensibilité vis-à-vis les stress abiotiques appliqués avec l'ordre : Zn < NaCl ≈ Cu < Interaction (métaux lourds-salinité).

- La fève est affecté par les métaux, cette plante présente un ordre de sensibilité vis-à-vis les métaux lourds : Zn < Cu.

Perspectives

Suite aux résultats que nous venons de décrire, nous pouvons proposer quelques perspectives afin d'apporter de nouvelles informations sur les réponses de *Vicia faba* L. aux stress salin et métalliques.

- ❖ Il serait important d'étudier l'effet combiné des métaux sur *Vicia faba* L., vu que les sols agricoles sont généralement polycontaminés.
- ❖ L'application de cette étude sur différents stades de cycle de vie sur le champ au lieu de se limiter à des tests de laboratoire, car notre expérimentation a été effectuée sous serre sur des temps limités et dans des volumes de substrat réduit.
- ❖ Le dosage des métaux lourds dans les sols et les différentes parties des plantes de *Vicia faba* L. serait nécessaire pour étudier la spéciation et la biodisponibilité du (Cu/Zn) dans le sol et leurs mobilité à l'intérieur de la plante, pour améliorer les connaissances sur les facteurs qui interviennent dans le transfert du (Cu/Zn) vers les parties photosynthétiques.
- ❖ Il est très important de tester d'autres paramètres pour enrichir ce travail, tel que les paramètres anatomiques et chimiques plus complètes sur le sol et la plante, pour vérifier l'action conjuguée finale de ces trois contraintes.

Les résultats obtenus relatifs aux réponses morpho-physiologiques et biochimiques de *Vicia faba* L. contre les stress abiotiques de salinité (NaCl), de métaux lourds (Cu et Zn) et de l'interaction (salinité-métaux lourds) sont regroupés et illustrés dans le tableau récapitulatif suivant (Tableau.65) :

Tableau 65 : Tableau récapitulatif des principaux résultats de l'effet combiné de salinité et métaux lourds sur les paramètres biochimiques et morpho-physiologiques de *vicia faba* L.

	paramètres	NaCl	Cu	NaCl-Cu	Zn	NaCl-Zn	
paramètres morpho-physiologiques	Nbre feuilles	↓	↓	↓	↓	↓	/
	LT	↓	↓	↓	↓	↓	LT>LR
	LR	↓	↓	↓	↓	↓	
	TRE	↓	↓	↓	↓	↓	/
	PFA	↓	↓	↓	↓	↓	PA>PR
	PFR	↓	↓	↓	↓	↓	
	PSA	↓	↓	↓	↓	↓	PA>PR
	PSR	↓	↓	↓	↓	↓	
paramètres biochimiques	Chlorophyll e	Chl a	↓	↓	↓	↓	Chl T> Chl a >Chl b
		Chl b	↓	↓	↓	↓	
		Chl T	↓	↓	↓	↓	
	Protéine e	PA	↓	↓	↓	↓	PA>PR
		PR	↓	↓	↓	↓	
	proline	PA	↑	↑	↑	↑	PA>PR
		PR	↑	↑	↑	↑	
	Sucres soluble	PA	↑	↑	↑	↑	PA>PR
		PR	↑	↑	↑	↑	
	Polyphénols	PA	↑	↑	↑	↑	PA>PR
		PR	↑	↑	↑	↑	
	Flavonoïdes	PA	↑	↑	↑	↑	PA>PR
		PR	↑	↑	↑	↑	
	Ordre de sensibilité aux métaux lourds				Zn <Cu		
Ordre de sensibilité aux stress abiotiques				salinité <métaux lourds < métaux lourds-salinité			

Conclusion générale

LT : longueur des tiges, **LR** : longueur des racines, **PA** : partie aérienne, **PR** : partie racinaire

PFA : poids frais des parties aériennes, **PFR** : poids frais des parties racinaires,

PSA : Poids sec des parties aériennes, **PSR** : Poids sec des parties racinaires.

Références
Bibliographiques

Références Bibliographiques

- **Abdel-Wahab, DA., Othman NARM., Hamada, AM. (2019).** Effects of copper oxide nanoparticles to *Solanum nigrum* and its potential for phytoremediation. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 137, 525–539. <https://doi.org/10.1007/s11240-019-01588-5>.
- **Adekiya, AO., Agbede TM., Aboyeji CM., Dunsin O., Ugbe, JO. (2017).** Green manures and NPK fertilizer effects on soil properties, growth, yield, mineral and vitamin C composition of okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench). *J. Saudi Soc. Agric. Sci.* (in press). 18 , 218- 223doi: 10.1016/j.jssas.2017.05.005.
- **Adrees, M., Ali S., Rizwan, M., Ibrahim, M., Abbas, F., Farid, M., Bharwana, SA. (2015).** The effect of excess copper on growth and physiology of important food crops: a review. *Environ Sci Pollut Res.* 22:8148–8162.
- **Adriano, DC. (2001).** Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability and risks of metals. *2nd Edition Springer-Verlag*, New York, Berlin, Heidelberg, p 867.
- **Adriano, D C. (2001).**Trace elements in the Terrestrial Environment. Springer Verlag, New York, 866p.
- **Adriano, D C., Wenzel, WW., Vangronsveld, J., Bolan, NS. (2004).** Role of assisted natural remediation in environmental cleanup. *Geoderma, Biogeochemical processes and the role of heavy metals in the soil environment*122, 121–142. doi:10.1016/j.geoderma.2004.01.003.
- **Agastian, P., Kingsley, S J., Vivekanandan, M. (2000).** Effect of salinity on photosynthesis and biochemical characteristics in mulberry genotypes. *Photosynthetica*, 38(2), 287-290.

Références Bibliographiques

- **Agbenin, JO ., Felix-Henningsen, P. (2004).** Dynamics of copper fractions and solubility in a savanna soil under continuous cultivation. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 68, 117–125.
- **Ahanger, MA., Bhat ,JA., Siddiqui, MH., Rinklebe, J., Ahmad, P. (2020).** Integration of silicon and secondary metabolites in plants: a significant association in stress tolerance. *Journal of Experimental Botany*.71:6758-6774. DOI: 10.1093/jxb/eraa291.
- **Ahmad, P., Nabi, G., Ashraf, M. (2011).** Cadmium-induced oxidative damage in mustard [*Brassica juncea* (L.) Czern. & Coss.] Plants can be alleviated by salicylic acid. *South African Journal of Botany*. 77, 36-44.
- **Alamgir, ANM., Ali, MY. (1999).** Effect of salinity on leaf pigments, sugar and protein concentrations and chloroplast ATPase activity of rice (*Oryza sativa* L.). *Bang J Bot* **28**, 145–149.
- **Alaoui-Sossé, B., Genet P., Vinit-Dunand F., Toussaint ML., Epron D., Badot, PM.(2004).**Effect of copper on growth in cucumber plants and its relationships with carbohydrate accumulation and changes in ion contents. *Plant Sci*. 166:1213–1218.
- **Albouchi, A., Béjaoui ,Z., Hédi El Aouni ,M.(2003).**Influence of moderate or severe water stress on the growth of *Casuarinaglauca*Sieb.Seedlings.15TSécheresse, 14, (3), p. 137 142.15.
- **Albouchi, A., Sebei, H., Mezni, M.Y., El Aouni, M.H. (2000).** Influence de la durée d'une alimentation hydrique déficiente sur la production de biomasse, la surface transpirante et la densité stomatique d'*Acacia cyanophylla* Lindl. *Ann. Institut National de Recherches en Génie rural, Eaux et Forêts (INRGREF, Tunis)*, **4** :138–161.
- **Aldrich , AP., Kistler, D., Sigg, L. (2002).** Speciation of Cu and Zn in drainage water from agricultural soils. *Environmental Science and Technology*, 36, 4824-4830.

Références Bibliographiques

- **Alem, C ., Amri, A. (2005).** Importance de la stabilité des membranes cellulaires tolérance à la salinité chez l'orge. Maroc. 4: 20-32.
- **Alloway, B.J. (2013).** Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in soils and their Bioavailability. *Environ.Pollut*, 22:11-50.
- **Anatole-Monnier, L. (2014).** Effets de la contamination cuprique des sols viticoles sur la sensibilité de la vigne à un cortège de bio-agresseurs. Thèse de doctorat, université de Bordeaux, pp 21.
- **Andrade, SAL ., Gratão, PL., Azevedo, RA., Silveira, APD., Schiavinato, MA., Mazzafera,P. (2010).** Biochemical and physiological changes in jack bean under mycorrhizal symbiosis growing in soil with increasing Cu concentrations. *Environ. Exp. Bot.* 68:198–207.
- **Anwar, F., Alghamdi SS., Ammar MH., Siddique K. (2011).** An efficient in vitro regeneration protocol for faba bean (*Vicia faba* L.). *J. Med. Plants Res.* 5, 6460– 6467.
- **Aouar-Sadli , M., Louadi, K., Doumandji ,S E . (2008).** Pollination of the broad bean (*Vicia faba* L. var. major) (Fabaceae) by wild bees and honey bees (Hymenoptera: Apoidea) and its impact on the seed production in the Tizi-Ouzou area (Algeria). *African Journal of Agricultural Research.* 3 (4): 266-272.
- **Arduini , I., Godbold ,DL., Onnis ,A. (1994).** Cadmium and copper change root growth and morphology of *Pinus pinea* and *Pinus pinaster* seedlings. *Physiol. Plant*, 92, 675-680.
- **Asati, A., Pichhode, M., Nikhil, K. (2016).** Effect of heavy metals on plants: an overview. *Int J Appl Innov Eng Manag* 5(3), 56–66.
- **Asloum, H. (1990).** Elaboration d'un système de production maraîchère (Tomate, *Lycopersicum esculentum*.L) en culture hors sol pour les régions sahariennes. Utilisation de

Références Bibliographiques

substrats sableux et d'eaux saumâtres. Thèse de doctorat, développement et amélioration des végétaux, Université de Nice Sophia- Antipolis: 24- 32.

- **Assad, M. (2017).** Transfert des éléments traces métalliques vers les végétaux mécanismes et évaluation des risques dans des environnements exposés à des activités anthropiques. Thèse du doctorat L'université Bourgogne Franche-Comté, France.
- **Atmane, R., Houda, E., Abdellatif, R. (2003).** Comportement vis-à-vis de la salinité de calcs de porte-greffes d'agrumes *Citrus aurantium*, *Citrange troyer* et *Poncirus trifoliata*: évaluation de critères certifiant la réponse des agrumes au stress salin. *Agronomie, EDP Sciences*, **23 (7)**, pp.643-649.
- **Aurélie M. (2009).** Réponses physiologiques de végétaux supérieurs aux stress métalliques. Caractérisation du rôle des parois cellulaires dans les stratégies défensives des cellules de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) face aux éléments traces métalliques. Thèse de doctorat en sciences agronomiques. Université d'Artois, Faculté des Sciences Jean Perrin. Ecole Doctorale Biologie et Santé de Lille, France, p 153.
- **Austruy, A., Laplanche C., Mombo, S. (2016).** Ecological changes in historically polluted soils: Metal(loid) bioaccumulation in microarthropods and their impact on community structure. *Geoderma* 271:181–190. doi: 10.1016/j.geoderma.2016.02.011.
- **Azooze, MM ., Elhamd, MFA., Al-Fredan, MA. (2012).** Biphasic effect of copper on growth, proline, lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities of wheat (*Triticum aestivum* cv. Hasaawi) at early growing stage. *American Journal of Plant Sciences*. 6:688-694.
- **Azouz , MM., Youssef ,MM., Al-Omair, MA. (2011).** Comparative evaluation of zinc and lead and their synergistic effects on growth and some physiological responses of Hassawi Okra (*Hibiscus esculentus*) seedlings. *American journal of plant physiology* 6 (6): 269-282.

Références Bibliographiques

- **Baize, D. (1997).** Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols. Références et stratégies d'interprétation. Editions INRA. Paris. France, p 408.
- **Baize, D. (2000).** Teneurs totales en métaux lourds dans les sols français, résultats généraux du programme APITET. *Le courrier de l'environnement*, 35, 9p.
- **Bargagli, R. (1998).** Trace elements in terrestrial plants. An ecophysiological approach to biomonitoring and biorecovery. *Springer*. p 324.
- **Barriuso, E., Coquet, Y., Louchart, X. (2011).** Pollution diffuses : mobilité et persistance des polluants organiques dans les sols (chapitre 25), sols et environnement pages 597 à 619.
- **Barrs, HD., Weatherley, PE. (1962).** A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. *Aust J Biol Sci* **15(3)**, 413-428.
- **Bartosz, G. (2003).** Génération of reactive oxygen species in biological Systems. *Comments on toxicology*, 9, 5-21.
- **Basile, A., Sorbo, S., Conte, B., Cardi, M., Esposito, S. (2013).** Ultrastructural changes and heat shock proteins 70 induced by atmospheric pollution are similar to the effects observed under in vitro heavy metals stress in *Conocephalum conicum* (Marchantiales–Bryophyta). *Environ Pollut* **182**, 209–216.
- **Ben Khaled, L., Gómez, A., Honrubia, M., Oihabi, A. (2003).** Effet du stress salin en milieu hydroponique sur le trèfle inoculé par le Rhizobium. *Agronomie, EDP Sciences*, **23** (7), 553-560.
- **Benahmed, H., Zid, E., El Gazzah, M., Grignon, C. (2010).** Croissance et accumulation ionique chez *Atriplex halimus L.* *Cahiers Agricul*, Vol. 5 : 367-372.
- **Benavides, MP., Gallego, SM., Tomaro, ML. (2005).** Cadmium toxicity in plants. *Braz J Plant Physiol* **17**, 21-34. <https://doi.org/10.1590/s1677-04202005000100003>.

Références Bibliographiques

- **Benhammou, N., Atik Bekkara, F., Kadifkova Panovska, T. (2008).** Antioxidant and antimicrobial activities of the *Pistacia lentiscus* and *Pistacia atlantica* extracts. *Afr. J. Pharm Pharmacol*, Vol. 2 (2): 022-028.
- **Benouis, S. (2012).** Contribution à l'étude de l'effet des métaux lourds (Cuivre) sur les caractéristiques biométriques et chimiques de la fève (*Vicia faba* L.).Thèse de magistère de l'université Abdelhamid Ben Badis- Mostaganem, Algérie.
- **Benouis, S. (2022).** Effet du cuivre sur les paramètres morfo-physiologiques et enzymatiques chez la fève (*Vicia faba* L.).Thèse de doctorat de l'université Abdelhamid Ben Badis- Mostaganem, Algérie.
- **Bérard, A., Capowiez L., Mombo S. (2015).** Soil microbial respiration and PICT responses to an industrial and historic lead pollution: a field study. *Environ Sci Pollut Res.* doi: 10.1007/s11356- 015-5089-z.
- **Bermudez, GMA., Jasan, R., Pla, R., Maria, L. Pignata, M.L. (2012).** Heavy metals and trace elements in atmospheric fall-out: Their relationship with topsoil and wheat element composition. *J. Hazard Mater*, 447- 456.
- **Berthomieu. (2003).** Function analysis of *athkt1* in *arabidopsis* shows that Na recirculation by the phloem is crucial for salt tolerance *Embo Journal* 22, 2004-2014.
- **Bessoule, JJ., Mench, M. (2002).** Sols et déchets - Biomarqueurs métaboliques d'effet et d'exposition des végétaux aux métaux traces : candidats lipidiques. Rapport Convention ADEME / Université de Bordeaux 2 n° 9975 010.
- **Bezzaia, A. (2005).** Essai d'introduction de l'arganier (*Argania spinosa* L. Skeels) dans la zone de M'Doukel et évolution de quelques paramètres de résistance à la sécheresse. Thèse de magistère en sciences agronomique. Université de Batna Algérie, 142p.

Références Bibliographiques

- **Bhattacharya, RC., Maheswari, M., Dineshkumar, V., Kirti, PB., Bhat, SR., Chopra, VL. (2004).** Transformation of *Brassica oleracea* Var.Capitata with bacterial beta gene enhances tolerance to salt stress. *Scientia Horticulturae*. **100**, 215-227.
- **Bi, X., Feng, X., Yang, Y., Li, X., Shin, G.P.Y., Li, F., Qiu, G., Li, G., Liu, T., Fu, Z. (2009).** Allocation and source attribution of lead and cadmium in maize (*Zea mays* L.) impacted by smelting emissions. *Environ Pollut*, 157: 834-839.
- **Bibbiani, S. (2017).** Zn stress in *Tetradenia riparia*. Analysis of physiological responses, interaction with water stress and VOCs emission. These du doctorat L'université de Florence, Italie
- **Bierkens, JG. (2000).** Applications and pitfalls of stress-proteins in biomonitoring. *Toxicology*. 153, 61–72. Doi: 10.1016/S0300-483X (00)00304-8.
- **Bihoux, P., Guillebon, B. (2010)** .Quel futur pour les métaux ? Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société. EDP Sciences.
- **Bliefert, C., Perraud, R. (2001).** Chimie de l'environnement : eau, air, sol, déchets. De Boeck Université. 477p.
- **Blum, A. (1988).** Plant breeding for stress environments; pp. 163-178. CRC Press, Boca Raton, FL.USA.
- **Blumwald, E., Aharon, GS. Apse, MP. (2004).** Sodium transport in plant cells. *Biochim. Biophys. Acta*. 1465: 140-151.
- **Boudiaf, K. (2006).** Etude des effets anti-xanthine oxydoreductase et anti -radicalaires des extraits des graines de *Nigella sativa*. Thèse de magister d'université de Sétif, Algérie.
- **Bourrelier, P., Berthelin, J. (2008).** Contamination des sols par les éléments en traces: les risques et leur gestion. Rapport n°42 à l'Académie des Sciences. Paris, France: Lavoisier Tec & Doc, p 440.

Références Bibliographiques

- **Bouزيد Nedjimia., Youcef, D. (2009).** Cadmium accumulation in *Atriplex halimus subsp. Schwein furthii* and its influence on growth, proline, root hydraulic conductivity and nutrient uptake. *Flora.*, **204**,316-324.

- **Bouznad, Z., Louanchi, M., Allala, L et Merabti, N. (2011).** Les maladies de la fève en Algérie : cas de la maladie à tache chocolat causée par *Botrytis* spp. Quatrième journées scientifiques et techniques phytosanitaires. I.N.A El Harrach, 2p.

- **Bouzoubaa, Z., El Mourid, M., Karrou, M., El Gharous, MR. (2001).** Manual of chemical and biochemical analysis of the plants. The Deroua Experimental Station of Institut National de Recherche Agronomique Morocco.

- **Bradford, MM. (1976).** A rapid and sensitive method for the determination of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry.* **72**, 248-254.

- **Bravin, M N. (2008).** Processus rhizosphériques déterminant la biodisponibilité du cuivre pour le blé dur cultivé en sols à antécédent viticole. Thèse de doctorat. Montpellier SupAgro. France

- **Brignon, JM., Malherbe, L. (2005).** Cadmium et ses dérivés. INERIS – Données technico-économiques sur les substances chimiques en France, Verneuil en Halatte, 25 p.

- **Brink, M., Belay, G. (2006).** Ressources végétales de l'Afrique tropicale 1 : céréales et légumes secs, Prota, Pays bas, pp. 221-223.

- **Broadley, MR., White, PJ. Hammond, JP. Zelko, I., Lux, A. (2007).** Zinc in plants. *New Phytol* **173**, 677–702.

- **Brun, LA., Maillet J., Hinsinger, P., Pepin, M. (2001).** Evaluation of copper availability to plants in copper-contaminated vineyard soils. *Environmental Pollution*, **111**, 293-302.

Références Bibliographiques

- **Callender, E., Rice, KC. (2000).** The urban environmental gradient: Anthropogenic influences on the spatial and temporal distributions of lead and zinc in sediments. *Environ.Sci. Technol*, 34(2): 232-238.
- **Carvalho Bertoli, A., Gabriel Cannata, M., Carvalho, R., Ribeiro Bastos, A R., Puggina Freitas, M., dos Santos Augusto, A. (2012).** *Lycopersicon esculentum* submitted to Cd-stress ful conditions innutrition solution: Nutrient contents and translocation. *Ecotox Environ Safe*, 86: 176-181.
- **Cetois, A., Quesnoit M., Hinsinger, P. (2003).** Soil copper mobility and availability. A review, 110 p.
- **Chai, M., Shi, F., Li, R., Qiu, G., Liu, F. (2014).** Growth and physiological responses to copper stress in a halophyte *Spartina alterniflora* (Poaceae). *Acta Physiol Plant*. 36:745–754. DOI 10.1007/s11738-013-1452-1.
- **Chaibi Cossentini, W. (1995).** Etude physiologique ultra structurale et cyto enzymologique de l'effet du chlorure de sodium chez *Medicago sativa* L. (cultivar de Gabes). Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de Tunis, 224 P.
- **Chaieb, N., Bouzlama M., Mars, M. (2011).** Growth and yield parameters variability among faba bean (*Vicia faba* L.) genotypes. *J. Nat. Prod. Plant Resour*. 1 (2) : 81-90.
- **Chaignon, V., Sanchez-Neira, I., Herrmann, P., Jaillard, B., Hinsinger, P.(2003).** Copper bioavailability and extractability as related to chemical properties of contaminated soils from a vine-growing area. *Environmental pollution*, 123, 229-238.
- **Chang, HB ., Lin, CW., Huang, HJ. (2005).** Zinc-induced cell death in rice (*Oryza sativa* L.) roots. *Plant Growth Regul* **46**, 261–266.
- **Chartzoulakis, K., Klapaki, G. (2000).** Response of two greenhouse pepper hybrids to NaCl salinity during different growth stages. *Scientia Horticulturae*, **86(3)**: p. 247-260.

Références Bibliographiques

- **Chatterjee, C., Dube, BK., Sinha, P., Srivastava, P. (2004).** Detrimental effects of lead phytotoxicity on growth, yield, and metabolism of rice. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. **35 (1-2)**, 255-265.
- **Chatterjee, J., Chatterjee, C. (2000).** Phytotoxicity of cobalt, chromium and copper in cauliflower. *Environmental Pollution*. **109**, 69-74.
- **Chaux, C., Foury, C. (1994).** Production légumière : légumineuses potagères, légumes fruits, Lavoisier, Paris. pp. 4-8.
- **Chen , Z., Pottosin, II., Cuin ,TA., Fuglsang, AT., Tester, M., Jha, D., Zepeda-JazoI.,Zhou M., Palmgren ,M.G., Newman I.A., Shabala S.(2007).** Root Plasma Membrane Transporters Controlling K⁺/Na⁺ Homeostasis in Salt-Stressed Barley. *Plant Physio*. 145: 1714-1725.
- **Chen, YX ., Wang, YP., Lin, Q ., Luo, YM. (2005).** Effect of copper-tolerant Rhizosphere bacteria on mobility of copper in soil and copper accumulation by *Elsholtzia splendens*. *Environment International*, Vol. 31: 861-866.
- **Chérifi, K., Anagri, A., Boufous, E. El Mousadik A. (2017).** Effet du Chlorure de sodium (NaCl) sur la croissance de six espèces d'*Acacia*. *Am J Innov Res Appl Sci* **4(4): 105-113.**
- **Chérifi, K., Anagri, A., Boufous, E. El Mousadik A. (2017).** Effet du Chlorure de sodium (NaCl) sur la croissance de six espèces d'*Acacia*. *Am J Innov Res Appl Sci* **4(4): 105-113.**
- **Cheruth, A., Manivannan, P., Sankar, B., Kishorekumar, A., Gopi, R., Somasundaram, R., Panneerselvam, R. (2007).** Induction of drought stress tolerance by ketoconazole in *Catharanthus roseus* is mediated by enhanced antioxidant potentials and secondary in metabolite accumulation. *Colloids Surf B: Biointerfaces* 60(2), 201-6.

Références Bibliographiques

- **Chopin E.I.B., Marin, B., Mkoungafoko, R., Rigaux, A., Hopgood, M.J., Delannoy, E., Cancès, B., Laurain, M. (2008).** Factors affecting distribution and mobility of trace elements (Cu, Pb, Zn) in a perennial grapevine (*Vitis vinifera* L.) in the Champagne region of France. *Environmental Pollution*, 156, 1092-1098.
- **Chugh, LK., Gupta, VK., Sawhney, SK. (1992).** Effect of cadmium on enzymes of nitrogen metabolism in pea seedlings. *Phytochemistry*. **31**, 395-400.
- **Chun, SC., Paramasivan, M., Chandrasekaran, M (2018).** Proline accumulation influenced by osmotic stress in arbuscular mycorrhizal symbiotic plants. *Frontiers in Microbiology* 9: 2525.
- **Clemens, S., Palmgren, MG., Krämer, U. (2002).** A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends Plant Science*. **7**, 309-315.
- **Cocozza, C., Palumbo, G., Colombo, C., Pinto, V. (2013).** Caratteristiche fisiologiche (Ed) accumulo di cadmio in roverella (*Quercus pubescens* Willd.). *Forest*, 9: 217-226.
- **Cook, CM., Kostidou, A., Vardaka, E., Lanaras, T. (1997).** Effects of copper on the growth, photosynthesis and nutrient concentrations of Phaseolus plants. *Photosynthetica*. **34**, 179-193.
- **Cottenie, A. (1977).** le sol comme réservoir et tampon naturel dans l'environnement. *Pédologie*, 27 (1): 105-109.
- **Cottenie, A. (1983).** Trace element in agriculture and the environment. *Lab. Anal. Agrochemistry*, S.U.G. Gent, 74p.
- **Cramer, GR. (2002).** Response of abscisic acid mutants of *Arabidopsis* to salinity. *Funct Plant Biol* **29**, 561-67.

Références Bibliographiques

- **Crowe, JH., Hoekstra, FA., Crowe, CM. (1992).** Anhydrobiosis, *Ann. Rev. Plant Physiol.* 54, 579-599.
- **Cuypers ,A. (2000).** Phytotoxic concentrations of copper and zinc induce antioxidative defence in *Phaseolus vulgaris*, cv. Limburgse vroege: a comparative study. Limburgs universitair centrum, Diepenbeek, Belgium.
- **Cuypers, AJ., Vangronsveld., Clijsters, H. (2000).** Biphasic effect of copper on the ascorbate glutathione pathway in primary leaves of *Phaseolus vulgaris* seedlings during the early stages of metal assimilation. *Physiologia Plantarum*, Vol. 110: 512-517.
- **Dar, AS., Rather BA., Wani AR., Ganie, MA. (2017).** Resistance against Insect pests by plant phenolics and their derivative compounds. *Chemical Science Review and Letters*.6:1073-1081.
- **Demirevska-Kepova , K., Simova-Stoilova, L., Stoyanova, Z., Holzer, R., Feller, U. (2004).** Biochemical changes in barley plants after excessive supply of copper and manganese. *Environmental and Experimental Botany*. **52**, 253-266.
- **Desclos, M., Dubousset, L., Etienne, P., Caherec, F., Hiroyushi S., Avice J.(2008).** A Proteomic Profiling Approach to Reveal a Novel Role of Brassica napus Drought 22 kD/Water-Soluble Chlorophyll-Binding Protein in Young Leaves during Nitrogen Remobilization Induced by Stress ful Conditions. *Plant Physiol.* 147: p1830-1844.
- **Di Baccio, D., Tognetti, R., Minnocci, A., Sebastiani, L. (2009).** Responses of the *Populus ×euramericana* clone I-214 to excess zinc: carbon assimilation, structural modifications, metal distribution and cellular localization. *Environmental and Experimental Botany*. **67 (1)**, 153–163.

Références Bibliographiques

- **Djerroudi-Zidane, O., Belkhodja, M., Bissati, S., Hadjadj, S. (2010).** Effect of saline stress on the proline accumulation in two species *Atriplex halimus* L. and *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. *European Journal of scientific research*. **41 (2)**, 248-259.
- **Dos Santos, WD., Ferrarese, MDL., Finger, A., Teixeira, CAN., Ferrarese, O. (2004).** Lignification and related enzymes in *Glycine max* root growth-inhibition by ferulic acid. *Journal of Chemical Ecology*., **30**, 1203-1212.
- **Drażkiewicz, M., Skórzyńska-Polit, E., Krupa, Z. (2004).** Copper-induced oxidative stress and antioxidant defence in *Arabidopsis thaliana*. *BioMetals* 17(4):379-387.
- **Drazkiewicz, A. (1994).** Chlorophyllase: occurrence, functions, mechanism of action, effects of external and internal factors. *Photosynthetica*. **30**, 321-331.
- **Dreier, W., Göring, M. (1974).** Dereim slushoher solz kongentrasion en aies verschideu physiologcshe parametrvan-mais wrzeln wiss. Z. Drh. Berlin Nath. Natur wiss R **23**, 641-4.
- **Drevon, JJ., Sifi, B. (2003).** Fixation symbiotique de l'azote et développement durable dans le bassin méditerranéen. INRA Paris. Les colloques, n°100. 381-388.
- **Dubey, RS. (1997).** Nitrogen metabolism in plants under salt stress. In *Strategies for Improving salt Tolerance in Higher Plants*, eds, Jaiwal, PK., Singh RP and Gulati A, 129-158 New Delhi, India: IBH Publication.
- **Dubey, RS., Singh, AK. (1999).** Salinity induces accumulation of soluble sugars and alters the activity of sugar metabolizing enzymes in rice plants. *Biol. Plant*. **42**: 233-239.
- **Dubois, M., Gilles, K., Hamilton, J., Rebers, P., Smith, F. (1956).** Colorimetric Method for Determination of sugar and related substances. *Analytical Chemistry*. **28**, 350- 356.
- **Duc, G., Aleksic JM., Marget P., Miki c A., Paull J., Redden, RJ. (2015).** Faba Bean. In: De Ron A. (eds) *Grain Legumes. Handbook of Plant Breeding*, vol 10. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2797-5_5.

Références Bibliographiques

- **EEA. (2007).** European Environment Agency (EEA). 2007. Progress in the management of contaminated sites (CSI 015).
- **Eichert, T., Kurtz, A., Steiner, U., Goldbach, H. (2008).** Size exclusion limits and lateral heterogeneity of the stomatal foliar uptake pathway for aqueous solutes and water-suspended nanoparticles. *Physiol. Plantarum*, 134:151-160.
- **Eleftheriou, E P., Karataglis, S. (1989).** Ultrastructural and morphological characteristics of cultivated wheat growing on copper polluted fields. *Botanica Acta*, 102, 134-140.
- **Epron, D., Farque, L., Lucot, E., Badot, PM. (1999).** Soil CO₂ efflux in a beech forest: the contribution of root respiration. *Ann For Sci* **56**, 289–295.
- **FAO (Food and Agriculture Organization). (2020).** Crop Production and Trade Data. <http://www.fao.org/faostat/en/#data>
- **FAO. (2008).** FAO Land and Plant Nutrition Management Service (<http://www.fao.org/ag/agl/agll/spush>).
- **FAO. (2017).** FAOSTAT Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available at: www.fao.org/faostat/ [accessed June 11, 2017].
- **Fernández-Calviño, D., Rodríguez-Suárez, J.A., López-Periago, E., Arias-Estévez, M., Simal-Gándara, J. 2008.** Copper content of soils and river sediments in a winegrowing area, and its distribution among soil or sediment components. *Geoderma*. 145, 91-97.
- **Foltete, AS. (2010).** Effets génotoxiques et systèmes de détoxification chez *Vicia faba* (Fabaceae) dans le cadre de l'évaluation des sols pollués. Thèse de doctorat, Université Paul Verlaine - Metz, p245.

Références Bibliographiques

- **Foltete, AS., Masfaraud J.F., Bigorgne E., Nahmani J., Chaurand P., Botta C., Labille J. (2011).** Environmental impact of sunscreen nanomaterials: ecotoxicity and genotoxicity of altered TiO₂ nanocomposites on *Vicia faba*. *Environ. Pollut.* 159, 2515–2522.
- **Fricke, W., Peters WS. (2002).** The biophysics of leaf growth in salt-stressed barley. A study at the cell level. *Plant Physiol* **129**, 374–88.
- **Gadallah, MAA. (1999).** Effect of proline and glycinebetaine on *Vicia faba* responses to salt stress. *Biol Plant* **42**, 249–257.
- **Gardea-Torresdey, JL., Peralta-Videa, JR., de la Rosa, G., Parsons, JG. (2005).** Phytoremediation of heavy metals and study of the metal coordination by X-ray absorption spectroscopy. *Coord. Chem. Rev.*, 36th International Conference on Coordination Chemistry, Merida, Mexico, July 2004 249, 1797–1810. doi:10.1016/j.ccr.2005.01.001
- **Genoux , C ., Putzola, F., Maurina, G. (1991).** Thème général: la lagune méditerranéenne, TPE: Les plantes halophytes.
- **Ghazaryan, K., Movsesyan ,H., Ghazaryan, N., Watts BA. (2019).** Copper phytoremediation potential of wild plant species growing in the mine polluted areas of Armenia. *Environmental Pollution.* 249, 491-501.
- **Ghnaya, T., Slama, I, Messedi, D., Grignon, C., Ghorbel, MH., Abdelly, C. (2007b).** Cd-induced growth reduction in the halophyte *Sesuvium portulacastrum* is significantly improved by NaCl. *J Plant Res* **120**, 309–316
- **Gill, SS., Tuteja, N. (2010).** Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiol Biochem* **48(12)**, 909-930.
- **Giordano, PM., Noggle, JC., Mortvedt JJ. (1974).** Zinc uptake by rice as affected by metabolic inhibitors and competing cations. *Plant Soil*, 41, 637-646.

Références Bibliographiques

- **Giroux, M., Deschênes, L., Chassé, R. (2008).** Les éléments traces métalliques (ÉTM): Leur accumulation dans les sols agricoles du Québec. In Institut de recherche et de développement en agroenvironnement.
- **Godbold, DL., Kettner, C. (1991).** Lead influences root growth and mineral nutrition of *Picea abies* seedlings. *J Plant Physiol* **139**, 95–99.
- **Gómez-Arroyo, S., Armienta MA., Cortás-Eslava J., Villalobos-Pietrini R. (1997).** Sister chromatid exchanges in *Vicia faba* induced by arsenic-contaminated drinking water from Zimapan, Hidalgo, Mexico. *Mutat. Res-Genet. Toxicol. Environ. Mutagen.* **394**, 1–7.
- **Gómez-Cadenas, A., Tadeo, FR., Primo-Millo, E., Talon, M. (1998).** Involvement of abscisic acid and ethylene in the responses of citrus seedlings to salt shock. *Physiol Plantarum* **103(4)**, 475-484.
- **Gong, Q., Wang, L., Dai, T., Zhou, J., Kang , Q., Chen, H., Li, K., Li, Z. (2019).** Effects of copper on the growth, antioxidant enzymes and photosynthesis of spinach seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety.* **171**, 771-780.
- **Gopal, R., Rizvi, AH. (2008).** Excess lead alters growth, metabolism and translocation of certain nutrients in radish. *Chemosphere.* **70(9)**, 1539–1544.
- **Graham, RD. (1981).** Absorption of copper by plants roots. *Copper in soils and plants.* Ed Loneragan J.F., Robson A.D. and Graham R.D., Academic Press, 141-163.
- **Gregory.B. (2005).** Écophysiologie de semis de conifères ectomycorhizés en milieu salin et sodique .Thèse de mémoire .Université Lava Canada .Chapitre 1.
- **Greipsson, S. (2011).** Phytoremediation. *Nature Education Knowledge*, Vol. 3: 10
- **Gupta, D., Nicoloso, F., Schetinger, M., Rossato, L., Pereira, L., Castro, G., Srivastava, S., Tripathi, R. (2009).** Antioxidant defense mechanism in hydroponically

Références Bibliographiques

- grown *Zea mays* seedlings under moderate lead stress. *Journal of Hazardous Materials*. **172(1)**, 479-484.
- **Gustavino, B., Ceretti E., Zani C., Zerbini I., Rizzoni M., Monarca S., Feretti, D. (2012).** Influence of temperature on mutagenicity in plants exposed to surface disinfected drinking water. *J. Water Resour. Prot.* **4**, 638–647.
 - **Hadjadj, S. (2009).** Contribution à l'étude de l'effet de la salinité sur des marqueurs biochimiques (proline et sucres solubles) de plantes juvéniles d'*Atriplex halimus* L. et d'*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. Mémoire de Magister en Biochimie et analyse des bioproduits, Univer, Kasdi Merbah, Ouargla, 100 P.
 - **Hajhashemi, S., Kiarostami, K., Enteshari, S., Sabbora, A. (2006).** The effects of salt stress and paclobutrazol on some physiological of two salt- tolérant and salt sensitive cultivars of wheat. *Pakistan Journal of Biological.* **9**, 1370-1374.
 - **Hall, J.L. (2002).** Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of Experimental Botany.* **366**, 1-11.
 - **Haouala, F., Ferjani, H., Ben El Hadj, S. (2007).** Effet de la salinité sur la répartition espèces ornementales. *Tropicultura.* Vol. 23 N°4, pp220-226.
 - **Hasegawa, P.M., Bressan, R.A., Zhu, J.K., Bonhert H.J. (2000).** Plantcellular and molecular responses to high salinity. *Annu. Rev. Plant. Physiol. Mol. BIOL* **51**: 463-499.
 - **Hassani, A., Dellal, A., Belkhodja, M., Kaid, M. (2008).** Effet de la Salinité sur l'eau et certains osmolytes chez l'orge (*Hordeum vulgare* L.). *European Journal of scientific Research.*, **23 (1)**, 61-69.
 - **Hediji, H., Djebali, W., Belkadhi, A., Cabasson, C., Moing, A., Rolin, D., Brouquisse, R., Gallusci, P., Chaïbi, W. (2015).** Impact of long-term cadmium exposure on mineral

Références Bibliographiques

- content of *Solanum lycopersicum* plants: Consequences on fruit production. *South African Journal of Botany.*, 97, 176-181.
- **Helal, HM., Mengel, K. (1979).** Nitrogen metabolism of young barley plants as affected by NaCl-salinity and potassium. *Plant and Soil* (51), 457-462.
 - **Hernandez, J., Jimenez, A., Mullineaux, P., Sevilla, F. (2000).** Tolerance of pea (*Pisum sativum* L.) to long-term salt stress is associated with induction of antioxidant defences. *Plant, cell & environ* 23(8), 853-862.
 - **Herzog, H. (1984).** Relation of source and sink during grain filling period in wheat and some aspects of its regulation. *Physiol. Plant.* 56: 155-160.
 - **Heuzé, V., Tran G., Delagarde R., Lessire M., Lebas, F. (2016).** Faba bean (*Vicia faba*). Feedipedia, a Programme by INRA, CIRAD, AFZ and FAO. Available at: <http://www.feedipedia.org/node/620>. *Hist. Archaeobot.* 15:197-204.
 - **Hoagland, DR, Arnon, DI. (1938).** the water-culture method for growing plants without soil. *Circular. California Agricultural Experiment Station.* 347, 1-39.
 - **Hopkins, WG. (2003).** *Physiologie Végétale.* Traduction de la 2ème édition américaine par Serge .R. Ed. De Boeck, p. 66-81.
 - **Hu , ZZ., Narayanaswamy, M., Ravikumar ,KE., Vijay-Shanker ,K., Wu ,CH. (2005).** Literature mining and database annotation of protein phosphorylation using a rule- based System. 2759- 2765.
 - **Ialelou, FS., Shafagh-Kolvanagh, J., Fateh, M. (2013).** Effect of various concentrations of Zn on chlorophyll, starch, soluble sugars and proline in naked pumpkin (*Cucurbita pepo*). *Inter J Farming Allied Sci* 2(24), 1198–1202.

Références Bibliographiques

- **Ibriz, M., Thami, AI., Alfaiz, C., Benbella, M. (2004).** Production des luzernes (*Medicago sativa* L.) des régions présahariennes du Maroc en conditions salines. *Fourrages* (180), 527-540.
- **Iqbal, M. (2016).** Vicia faba bioassay for environmental toxicity monitoring: A review. *Chemosphere*. 144, 785–802. doi:10.1016/j.chemosphere.2015.09.048.
- **Irfan, M., Aqil, A., Shamsul, H. (2014).** Effect of cadmium on the growth and antioxidant enzymes in two varieties of Brassica juncea. *Saudi Journal of Biological Sciences.*,21, 125-131.
- **Ishida, H., Yoshimoto, K., Izumi, M., Reisen, D., Yano, Y., Makino, A., Ohsumi, Y., Hanson, MR., Mae, T. (2008).** Mobilization of Rubisco and Stroma-Localized fluorescent Proteins of Chloroplasts to the Vacuole by an ATG Gene-Dependent Autophagic Process. *Plant Physiol.* p148.
- **Islam, E., Liu, D., Li, T., Yang, X., Jin, X., Mahmood, Q., Tian, S., Li, J. (2008).** Effect of Pb toxicity on leaf growth, physiology and ultrastructure in the two ecotypes of *Elsholtzia argyi*. *Journal of Hazardous Materials.* 154(1–3), 914-926.
- **Jamil, M., Bashir, S., Anwar, S., Bibi, S., Bangash, A., Ullah, F., Rha, ES. (2012b).** Effect of salinity on physiological and biochemical characteristics of different varieties of rice. *Pak J Bot* 44, 7–13.
- **Jana, S., Choudhuri, M. (1982).** Senescence in submerged aquatic angiosperms: effects of heavy metals. *New Phytologist.* 90, 477-484.
- **Jensen, E., Peoples, MB., Boddey, RM., Gressho, PM., Hauggaard-Nielsen, H., Alves, B.J. R.(2012).** Legumes for mitigation of climate change and the provision of feedstock for biofuels and bioreneries. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 329–364. doi: 10.1007/s13593-011-0056-7.

Références Bibliographiques

- **Jewell , AW., Murray, BG., Alloway, J. (1988).** Light and electron microscope studies on pollen development in barley (*Hodeum vulgare* L.) grown under copper-sufficient and deficient conditions. *Plant cell & Environment*, 11, 4, 273-281.
- **Jia, D., Yang JL., Li, CH. 2012.** Advances in metallotionein studies in forest trees. *Plant Omics*. 5:46-51.
- **Jiang, Q., Roche, D., Monaco, TA., Durham, S. (2006).** Gas exchange, chlorophyll fluorescence parameters and carbon isotope discrimination of 14 barley genetic lines in response to salinity. *Field Crops Research* **96**, 269–278.
- **Jing , Hou., Chunjie ,Wang., Yue, Zhou., Shiguo, Li., Tasawar, Hayat., Ahmed Alsaedi., Xiangke Wang. (2018).** Effects of uranium stress on physiological and biochemical characteristics in seedlings of six common edible vegetables *J Radioanal Nucl Chem* (2018) [https://doi.org/10.1007/s10967-018-5792-6\(0123456789](https://doi.org/10.1007/s10967-018-5792-6(0123456789).
- **John ,R., Ahmad, P., Gadgil, K., Sharma, S. (2008).** Effect of cadmium and lead on growth, biochemical parameters and uptake in *Lemna polyrrhiza* L. *Plant Soil Environment*. **54** (6), 262-270.
- **Jouili , H., El Ferjani ,E. (2003).** Changes in antioxidant and lignifying enzyme activities in sunflower roots (*Helianthus annuus* L.) stressed with copper excess. *C. R. Biol.* 326(7):639-644.
- **Kabata-Pendias, A., Pendias , H. (1984).** Trace elements in soils and plants. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- **Kabata-Pendias A. (2011).** Trace Elements in Soils and Plants. Fourth ed. CRC Press, Boca Raton, Taylor & Francis Group, LLC. 505 p.
- **Kabata-Pendias, A., Pendias, K. (2001).** Trace elements in soils and plants. Third Edition. CRC Press. Boca Raton, USA.

Références Bibliographiques

- **Kabata-Pendias, A., Pendias, K. (2011).** Trace Elements in Soils and Plants. 4th Edition, CRC Press, Boca Raton. USA.
- **Kadri, A., Midoun, N. (2015).** Effect of salt stress on some biochemical parameters of cultivated alfalfa (*Medicago sativa* L.). Kasdi Merbah University, Ouargla, Algeria, pp:31-40.
- **Kadri, A., Midoun, N. (2015).** Effect of salt stress on some biochemical parameters of cultivated alfalfa (*Medicago sativa* L.). Kasdi Merbah University, Ouargla, Algeria, pp:31-40.
- **Kalyanaraman , SB., Sivagurunathan, P. (1993).** Effect of cadmium, copper and zinc on the growth of blackgram. *Journal of Plant Nutrition*.**16**, 2029-2042.
- **Kaplan, C. (2010).** Indoor air pollution from unprocessed solid fuels in developing countries. *Reviews on environmental health*. **25(3)**, 221-242.
- **Karataglis , S., Babalonas, D. (1985).** The toxic effects of copper on the growth of *Solanum lycopersicum* L. collected from Zn and Pb soil. *Angewandte Botanik*, v.59, p.45-52.
- **Kastori, R., Petrovic M., Petrovic, N. (2008).** Effect of excess lead, cadmium, copper, and zinc on water relations in sunflower. *J. Plant Nutr.* 15: 2427-2439.
- **Khan, MA. (2001).** Effect of sodium chloride on growth, photosynthesis and mineral ions accumulation of different types of rice (*Ovsya sativa*). *J. Agronomy and science*: 149-161.
- **Khan, MA., Hamid, A., Salahuddin, A.B.M., Quasem, A., Karim, MA. (1997).** Effect of sodium chloride on growth, photosynthesis and mineral ions accumulation of different types of rice (*Ovsya sativa*). *J. Agronomy and science*: 149-161.
- **Khan, TA., Mazid, M., Mohammad, F. (2011).** Status of secondary plant products under abiotic stress: an overview. *J Stress Physiol Biochem* **7**, 75–98

Références Bibliographiques

- **Khateeb, W., Al-Qwasemeh, H. (2014).** Cadmium, copper and zinc toxicity effects on growth, proline content and genetic stability of *Solanum nigrum* L., a crop wild relative for tomato; comparative study. *Physiology and Molecular Biology of Plants* 20: 31-9.
- **Khavarinejad, RA., Mostofi, Y. (1998).** Effects of NaCl on photosynthetic pigments, saccharides, and chloroplast ultrastructure in leaves of tomato cultivars. *Photosynthetica* 35, 151–154.
- **Khedim, I. (2019).** Phytoremédiation par l’Atriplex planté dans des sols enrichis en cuivre, zinc, plomb et cadmium. Thèse de Doctorat de l’université de Mostaganem.
- **Khedr, AHA., Abbas, MA., Wahid, AAA., Quick, WP., Abogadallah, GM. (2003).** Proline induces the expression of salt stress responsive proteins and may improve the adaptation of *Pancreaticum maritimum* L. to salt stress. *J Exp Bot* 54, 2553–2562.
- **Khudsar, T., Uzzafar Mahmood, Iqbal, M., Sairam, RK. (2004).** Zinc-induced changes in morpho-physiological and biochemical parameters in *Artemisia annua*. *Biologia Plantarum*, 48 (2): 255-260.
- **Kihlman, B. (1975).** Root tips of *Vicia faba* for the study of the induction of chromosomal aberrations. *Mutat. Res-Environ. Mutagen. Relat. Subj.* 31 : 401– 412.
- **King, D., Citeau, L., Bispo, A., Bardy, M. (2008).** Gestion durable des sols. Editions Quae.
- **Kisa, D., Elmastas M., Ozturk L., Kayir, O. (2016).** Responses of the phenolic compounds of *Zea mays* under heavy metal stress. *Appl Biol Chem.* 59:813–820. DOI 10.1007/s13765-016-02299.
- **Kocchlin-Ramonatxo, C. (2006).** Oxygen, oxidative stress and antioxidant supplementation, or another way for nutrition in respiratory diseases. *Nutrition Clinique et Métabolisme.* 20, 165- 177.

Références Bibliographiques

- **Kopittke P, Menzies N. (2006).** Effect of Cu Toxicity on Growth of Cowpea (*Vigna unguiculata*). *Plant and Soil.* **279**, 287-296.
- **Kopittke, PM., Asher, CJ., Kopittke ,RA., Menzies, N W.(2007a).** Toxic effects of Pb²⁺ on growth of cowpea (*Vigna unguiculata*). *Environmental Pollution.***150**, 280-287.
- **Kopittke, PM., Menzies, NW., de Jonge MD., McKenna, BA., Donner, E., Webb, RI, Paterson, DJ., Howard, DL., Ryan, CG., Glover, CJ., Scheckel, KG., Lombi, E. (2011).** In situ distribution and speciation of toxic copper, nickel, and zinc in hydrated roots of cowpea. *Plant Physiology.* **156**, 663-673.
- **Kopittke, PM., Menzies, NW., de Jonge, MD., McKenna, BA. (2011).** In situ distribution of toxic copper and zinc in hydrated roots of cowpea. *Plant. Physiol*, 156: 663-673.
- **Kovalchuk, I., Titov, V., Hohn, B., Kovalchuk, O. (2005).** Transcriptome profiling reveals similarities and differences in plant responses to cadmium and lead. *Mutat. Res. Fundam. Mol. Mech. Mutagen.* 570, 149–161.
- **Kumchai, J., Huang, J Z., Lee, C Y., Chen, F C., Chin, S W. (2013).** Proline partially overcomes excess molybdenum toxicity in cabbage seedlings grown in vitro. *Genet. Mol. Res*, 12, 5589-5601.
- **Laamari , M., Khelfa, L.(2008).** Resistance source to cowpea aphid (*Aphis craccivora* Koch) in broad bean (*Vicia faba* L.) Algerian landrace collection. *African Journal of Biotechnology.* 7 (14): 2486-249
- **Lachhab, I., Louahlia, S., Laamarti, M., Hammani, Kh. (2013).** Effet d'un stress salin sur la germination et l'activité enzymatique chez deux génotypes de *Medicago sativa*. *Inter J Innov Appl Stud* **3(2)**, 512.

Références Bibliographiques

- **Lai , HY., Juang, KW., Chen, BC.(2010).** Copper concentrations in soils in central Taiwan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 56, 601-606.
- **Lakhdar, A., Iannelli, M.A., Debez, A., Massacci, A., Jedidi, N., Abdelly, C. (2010).** Effect of municipal solid waste compost and sewage sludge use on wheat (*Triticum aestivum*): growth, heavy metal accumulation and antioxidant activity. *J. Sci. Food Agric*, 90:965-971.
- **Landberg, T., Greger, M. (2002).** Differences in oxidative stress in heavy metal resistant and sensitive clones of *Salix viminalis*. *J. Plant Physiol.* 159(1):69-75.
- **Larcher. (1995).** *Physiological Plant Ecology*.3rd edition.Spinger.
- **Laumonier, R. (1997).** *Cultures légumières et maraîchères, Tome III.* Ed.J.B. BAILLIERE, 276p.
- **Lebreton, JC., Legraet, S., Guibert, S., Masson, F., Rigaud, JP et Roction, L. (2009).** *La fêverole d'hiver, chambre d'agriculture de l'Ome*, 10p.
- **Leme, DM., Marin-Morales MA. (2009).** *Allium cepa* test in environmental monitoring: a review on its application. *Mutat. Res-Rev. Mutat. Res.* 682: 71–81.
- **Lemzeri, H. (2007).** Ecophysiological responses of three forest species of the genus *Acacia*, *Eucalyptus* and *Schinus* (*A. cyanophylla*, *E. gomphocephala* and *S. mölle*) under saline stress. *Memory of Magister, Constantine University, Algeria* 180p.
- **Levent Tuna, A., Kaya, C., Dicitilas, M., Higgs, D. (2008).** The combined effects of gibber-elic acid and salinity on some antioxidant enzyme activities, plant growth parameters and nutritional status in maize plants. *Environmental and Experimental Botany*. 62, 1–9
- **Levignerou, A., Lopez, F., Varisuyt, G., Berthomien, P., Casse-Delbar T. (1995).** Les plantes face au stress salin. *Cahier d'agriculture.* (4): 263-273.

Références Bibliographiques

- **Levit J. (1980).** Salt and ion stress. In Levitt J. (eds). -Response of plant to environmental stresses. Vol II, water radiation, salt and others stresses. New York: Academic Press, p. 365– 406.
- **Li, J. (2003).** Protein profiling with cleavable isotope-coded affinity tag (cICAT) reagents: the yeast salinity stress response. *Molecular Cellular Proteomics*. **2(11)** ,1198-204.
- **Liang, X., Zhang, L., Natarajan, SK., Becker, DF. (2013).** Proline mechanisms of stress survival. *Antioxidants & Redox Signaling* 19: 998–1011.
- **Lichtenthaler, HK. (1987).** Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*.**148**, 351-382.
- **Lin, CC., Chen, LM., Liu, ZH. (2005).** Rapid effect of copper on lignin biosynthesis in soybean roots. *Plant Science*. **168**, 855-861.
- **Liu, MQ. Yanai, J., Jiang, RF., Zhang, F., McGrath, S P., Zhao, FJ. (2008).** Does cadmium play a physiological role in the hyperaccumulator thlaspi *caerulescens* ? *Chemosphere*, **71(7)**, 1276-1283.
- **Liu, L., Guan, D S., Peart, M R. (2012).** The morphological structure of leaves and the dust-retaining capability of afforested plants in urban Guangzhou, South China. *Environ.Sci. Pollut Res*, 19, 3440-3449.
- **Liu, S., Yang R., Pan Y., Ren B., Chen Q., Li X., Xiong X., Tao J., Cheng Q., Ma, M. (2016).** Beneficial behavior of nitric oxide in copper-treated medicinal plants. *Journal of Hazardous Materials*. 314: 140-154.
- **Lopes, C., Herva, M., Franco-Uría, A., Roca, E. (2012).** Multicorrelation models and uptake factors to estimate extractable metal concentrations from soil and metal in plants in pasturelands fertilized with manure. *J. Environ. Pollut*, 166: 17-22.

Références Bibliographiques

- **Loué, A. (1993).** Oligo-éléments en agriculture. Nathan: SCPA. 210p. Editions Nathan, 577 p.
- **Løvdal, T., Olsen, KM., Slimestad, R., Verheul, M., Lillo, C. (2010).** Synergetic effects of nitrogen depletion, temperature, and light on the content of phenolic compounds and gene expression in leaves of tomato. *Phytochem J* **71(5)**, 605-613.
- **Lüttge, U., Kluge, M., Bauer, G. (2002).** Botanique. 3ème éd. Eds. TEC et DOC, Lavoisier, Paris, 604 p.
- **Lyubenova, L., Schröder, P. (2010).** Soil Heavy Metals. *Soil. Biol*, 19: 65-58.
- **Ma, Y B., Lombi E., Oliver I W., Nolan, A L., McLaughlin, M J. (2006).** Long-term aging of copper added to soils. *Environmental Science & Technology*, 40, 6310-6317.
- **Maatougui, M.E.H. (2001).** Sodial: un acide organique pour la correction des problèmes de salinité des sols et des eaux salées. Séminaire National sur la Problématique de l'Agriculture des zones Arides et de la Reconversion, Sidi Bel Abbés, Algérie: 372- 378.
- **Macheix, JJ., Fleuriet, A ., Jay-Allemand ,C. (2005).** Les composés phénoliques des végétaux: un exemple de métabolites secondaires d'importance économique. Ed. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 4-5.
- **Maillard, J. (2001).** Le point sur l'irrigation et la salinité des sols en zone sahélienne. Risques et recommandations. Handicap International : 34p.
- **Malick, EHL., Diouf, M., Fatimata, N., Diallo, B., Diagne, HM., Diop, T. (2012).** Effet de la mycorhization et de la salinité sur la croissance, les réponses biochimiques et la productivité de *Jatropha curcas* L., cultivée sous serre. *Int J Biol Chem Sci* **6(4)**, 1757, 1758.

Références Bibliographiques

- **Malkowski ,E., Kita, A., Galas, W., Karez ,W., Michael ,K. (2002).** Lead distribution in corn seedlings (*Zea mays* L.) and its effect on growth and the concentration of potassium and calcium. *Plant Growth Regul.* **37**, 69-76.
- **Marcato, CE. (2007).** Origine, devenir et impact du cuivre et du zinc des lisiers porcins. Rôle de la digestion anaérobie. Thèse du doctorat, L'institut national polytechnique de Toulouse. p 184.
- **Markossian , KA., Kurganov ,BI. (2003).** Copper Chaperones, Intracellular Copper Trafficking Proteins. Function, Structure, and Mechanism of Action. *Biochemistry (Moscow)*68(8):827-837.
- **Marouf, A., Reynaud, J. (2007).** La botanique de A à Z 1662 définition. Ed. Dunod. p286
- **Marques, DM., da Silva AB., Mantovani JR., Magalhães PC., de Souza, TC. (2019).** Root morphology and leaf gas exchange in *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. (Caesalpinioideae)
- **Marschner , H .(1995).** Mineral Nutrition of Higher Plants, 2nd edn. London, UK, Academic Press. 889 p. mechanisms associated with trehalose-induced copper-stress tolerance in rice. *Sci*
- **Meloni, D.A., Oliva, M.A., Ruiz, H.A., Martinez, C.A. (2001).**Contribution of proline and inorganic solutes to osmotic adjustment in cotton under salt stress.*J.PlantNutr.* 24, 599–612.
- **Mengel , K., Kirkby ,EA. (2001).** Soil copper. In: Principles of plant nutrition, 5th Edition, *Kluwer Academic Publishers.* 599-611.
- **Mermoud, A. (2006).** Cours de physique du sol : Maîtrise de la salinité des sols. Ecole polytechnique fédérale de lausanne, 23p.

Références Bibliographiques

- **Mezni, M., Albouchi, A., Bizid, E., Hamza, M. (2002).** Effet de la salinité des eaux d'irrigation sur la nutrition minérale chez trois variétés de luzerne pérenne (*Medicago sativa*). *Agronomie* **22**, 283-291.
- **Michaud, A.M., Chappellaz, C et Hinsinger, P., 2008.** Copper Phytotoxicity affects root elongation and iron nutrition in durum wheat (*Triticum turgidum durum L.*). *Plant and Soil*, Vol. 310, 151-165.
- **Michaud, AM., Chappellaz, C., Hinsinger, P. (2007).** Copper Phytotoxicity affects root elongation and iron nutrition in durum wheat (*Triticum turgidum durum L.*). *Plant and Soil*, Vol. 310, 151-165.
- **Min, SH., Han, JS., Shin, EW., Park, JK. (2013).** Improvement of cadmium ion removal by base treated juniper fiber. *Water. Res.*, 38: 1289-1295.
- **Mishra , S., Srivastava, S., Tripathia, RD., Govindarajan, R., Kuriakose , SV., Prasad, MNV. (2006).** Phytochelatin synthesis and response of antioxidants during cadmium stress in *Bacopa monnieri L.* *Plant Physiology and Biochemistry.* **44**, 25-37.
- **Mittal, S., Kumari, N., Sharma, V. (2012).** Differential response of salt stress on Brassica juncea: photosynthetic performance, pigment, proline, D1 and antioxidant enzymes. *Plant Physiol Biochem* **54**, 17–26.
- **Monarca, S., Feretti D., Zani C., Rizzoni M., Casarella S., Gustavino B. (2005).** Genotoxicity of drinking water disinfectants in plant bioassays. *Environ. Mol. Mutagen.* 46: 96–103.
- **Monneveux, PH., Nemmar, M. (1986).** Contribution à l'étude de la résistance à la sécheresse chez le blé tendre (*Triticum aestivum L.*) et chez le blé dur (*Triticum durum Desf.*): étude de l'accumulation de la proline au cours du cycle de développement. *Agronomie, EDP Sciences* **6 (6)**, 583-590.

- **Morel , JL., Bitton G., Schwartz, C., Schiavon M. (1996).** Bioremediation of soils and waters contaminated by micropollutants: which role for plants? In: Ecotoxicology: Responses, Biomarkers and Risk Assessment, Chapter 4, OECD Workshop. Zelikoff J.T. (ed.). SOS Publications, Fair Haven, NJ. USA. 37-74.
- **Morinaga , K., Imai, S., Yakushiji ,H., Koshita ,Y. (2003).** Effects of fruit load on partitioning of ¹⁵N and ¹³C, respiration, and growth of grapevine roots at different fruit stages. *Scientia Horticulturae*, 97, 239-253.
- **Morris, CJ., Earl, JR., Trenam, CW., Blake, DR. (1995).** Reactive oxygen species and iron a dangerous partnership in inflammation. *Int J Biochem Cell Biol* 27, 109-122.
- **Mostofa, M., Hossain M., Fujita M., Tran, LSP. (2015).** Physiological and biochemical mechanisms associated with trehalose-induced copper-stress tolerance in rice. *Sci Rep*. 5: 11433. <https://doi.org/10.1038/srep11433>.
- **Moustakas, M., Eleftheriou, EP., Ouzounidou, G. (1997).** Short-term effects of aluminum at alkaline pH on the structure and function of the photosynthetic apparatus. *Photosynthetica*, Prague. 34, 169-177.
- **Mulugeta, W., Tesfaye , K., Getnet ,M., Ahmed, S., Nebiyu ,A., Mekuanint, F. (2019).** Quantifying yield potential and yield gaps of *faba bean* in Ethiopia. *Ethiop. J. Agric. Sci.* 29,105–120.
- **Munns , R. (2002).** Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell and Environment*, 25: 239-250.
- **Munns, R., James, RA. (2003).** Screening methods for salinity tolerance: a case study with tetraploid wheat. *Plant Soil* (235), 201-218.

Références Bibliographiques

- **Muñoz-Romero, V., López-Bellido L., López-Bellido, R.J. (2011).** Faba bean root growth in a Vertisol: tillage effects. *Field Crops Res.* 120: 338–344. doi: 10.1016/j.fcr.2010.11.008.
- **Nagajyoti, PC., Lee, KD., Sreekanth, TVM. (2010).** Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: A review. *Environmental Chemistry Letters.* 8(3): 199–216.
- **Nakayama ,T., Yonekura-Sakakibara, K., Kikuchi, S., Fukui, Y., Fukuchi Mizutani, M., Ueda, T., Nakao, M., Tanaka, Y., Kusumi, T., Nishino, T. (2000).** Aureusidin Synthase : A polyphenol oxidase homolog responsible for flower coloration. *Science*, 290, 1163-1166.
- **Navel, A. (2012).** Distribution, spéciation impact et transfert du cuivre dans un sol sous vigne : rôle de la structuration spatiale et du statut organique. Thèse de doctorat. Sciences de la Terre. Université Grenoble Alpes. pp 29.
- **Nazir, F., Hussain , A., Fariduddin, Q. (2019).** Hydrogen peroxide modulate photosynthesis and antioxidant systems in tomato (*Solanum lycopersicum L.*) plants under copper stress. *Chemosphere.* 230: 544-558.
- **Neggaz, N.Eh. (2019).** Effet combiné de la salinité et de métaux lourds (Plomb, Cuivre, et Zinc) sur les paramètres chimiques, biochimiques et morpho- physiologiques chez le radis (*Raphanus sativus L.*). thèse de doctorat de l'université Abdelhamid Ben Badis- Mostaganem, Algérie.
- **Noctor, G. (2006).** Metabolic signalling in defence and stress: the central roles of soluble redox couples. *Plant Cell Environ* **29**, 409–425.
- **Noreen, Z., Ashraf, M. (2018).** Changes in antioxidant anzymes and some key metabolites in some genetically diverse cultivars of blé (*Triticum aestivum L.*) *Environ Exp Bot* **67**, 395-402.

Références Bibliographiques

- **Nuessly, GS., Hentz MG., Beiriger R., Scully, BT. (2004).** Insects associated with faba bean, *Vicia faba* (Fabales: Fabaceae), in southern Florida. *Florida entomologist*. 87 (2): 204-211p.
- **Ohsumi, Y., Kitamoto K., Anraku, Y. (1988).** Changes induced in the permeability barrier of the yeast plasma membrane by cupric ion. *J. Bacteriol.*170: 2676–2682. *Omics*. 5:46-5.
- **OMS . (2018).** A global overview of national regulations and standards for drinking water quality. Geneva: World Health Organization. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- **OMS. (2004).** Copper in Drinking-water: Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. Geneva, World Health Organization (WHO/SDE/WSH/03.04/88).
- **Oncel, I., Keles, Y., Ustun, AS. (2000).** Interactive effects of temperature and heavy metal stress on the growth and some biochemical compounds in wheat seedlings. *Environment Pollution*. **107**, 315-320.
- **Oorts, K. (2013).** Copper. In: Alloway B (ed). *Heavy Metals in Soils*. Environmental Pollution, vol 22. Springer.
- **Ouariti, O., Gouia, H., Ghorbel, MH. (1997).** Responses of bean and tomato plants to cadmium: Growth, mineral nutrition, and nitrate reduction, *Plant Physiology and Biochemistry*. **35**, 347– 354.
- **Ouni, Y., Mateos-Naranjo, E., Abdely, C., Lakhdar, A. (2016).** Interactive effect of salinity and zinc stress on growth and photosynthetic responses of the perennial grass, *Polypogon monspeliensis*. *Ecological Engineering*. **95**, 171-179.
- **Ouzounidou, G., Ciamporová, M., Moustakas, M., Karataglis, S. (1995).** Responses of maize (*Zea mays* L.) plants to copper stress--I. Growth, mineral content and ultrastructure of roots. *Environ. Exp. Bot.* 35(2):167-176.

Références Bibliographiques

- **Pacheco, AMG ., Freitas, MC., Baptista, MS., Vasconcelos, M.T.S.D., Cabral, JP. (2008).** Elemental levels in tree-bark and epiphytic-lichen transplants at a mixed environment in mainland Portugal, and comparisons with an in situ lichen. *Environ Pollu*, 151: 326-333.
- **Pahlsson , AMB. (1989).** Toxicity of heavy metals (Zn, Cu, Cd, Pb) to vascular plants: A literature review. *Water Air Soil Pollution*. **47**, 287-319.
- **Pais, I., Benton Jones, J.(2000).** The handbook of Trace Elements. Boca Raton, FL, St. Lucie Press pp.223.
- **Pang, J., Cuin , T., Shabala, L., Zhou ,M., Mendham ,N., Shabala S.(2007).** Effect of Secondary Metabolites Associated with Anaerobic Soil Conditions on Ion Fluxes and Electrophysiology in Barley Roots. *Plant Physiol*. 145: 266-276.
- **Panou-Filotheo., Bosabalidis, AM. (2004).** Root structural aspects associated with copper toxicity in oregano (*Origanum vulgare* subsp. *Hirtum*). *Plant science*, 166, 1497-1504.
- **Parida, AK., Das, AB. (2005).** Salt tolerance and salinity effects on plants. *Ecotoxicology and environmental safety*. **60(3)**, 324-349.
- **Parida, AK., Das, AB., Das, P. (2002).** NaCl stress causes changes in photosynthetic pigments, proteins and other metabolic components in the leaves of a true mangrove, *Bruguiera parviflora*, in hydroponic cultures. *J Plant Biol* **45**, 28–36.
- **Paschke, MW., Redente, EF. (2002).** Copper toxicity thresholds for important restoration grass species of the western United States. *Environmental Toxicology and Chemistry*. **21**, 2692- 2697.
- **Patra , M., Bhowmik, N., Bandopadhyay, B., Sharma, A. (2004).** Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance. *Environmental and Experimental Botany*. **52**, 199-223.

Références Bibliographiques

- **Pätsikkä , E., Kairavuo ,M., Sersen ,F., Aro, E-M., Tyystjärvi ,E. (2002).** Excess Copper Predisposes Photosystem II to Photoinhibition in Vivo by Outcompeting Iron and Causing Decrease in Leaf Chlorophyll. *Plant Physiol.* 129(3):1359-1367.
- **Pedler, JF., Kinraide TB., Parker, DR. (2004).** Zinc rhizotoxicity in wheat and radish is alleviated by micromolar levels of magnesium and potassium in solution culture. *Plant Soil* **259**, 191–199.
- **Peron, JY. (2006).** Références. Production légumière. 2ème Ed. 613 p.
- **Pessarakli , M.(1999).** Handbook of Plant and Crop Stress. Marcel Dekker, USA, pp 1190.
- **Pessarakli, M. (1999).** Responses of green beans (*Phaseolus vulgaris* L.) to salt stress. In: M. Pessarakli, ed. Handbook of Plant and Crop Stress. 2nd ed. pp. 827–842.
- **Pessarakli, M. Tucker, TC. (1985).** Uptake of nitrogen-15 by cotton under salt stress. *Soil Science Society of America Journal.* **49**, 149–152.
- **Pessarakli, M., Marcum, KB., Kopec, DM. (2001).** Drought Tolerance of Twenty One Saltgrass (*Distichlis spicata*) Accessions Compared to Bermudagrass. Turfgrass Landscape and Urban IPM Research, Cooperative Extension, Agricultural Experiment Station, Department of Agriculture, The University of Arizona, Tucson, AZ, 1246 Series P-126. pp. 65–69.
- **Pich, A., Scholz, G. (1996).** Translocation of copper and other micronutrients in tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill.): nicotianamine-stimulated copper transport in the
- **Pietrzak , U., McPhail ,DC. (2004).** Copper accumulation, distribution and fractionation in vineyard soils of Victoria, Australia. *Geoderma*, 122, 151-166.

Références Bibliographiques

- **Poschenrieder, C., Gunsé B., Barceló, J. (1989).** Influence of cadmium on water relations, stomatal resistance, and abscisic acid content in expanding bean leaves. *Plant Physiol.* 90: 1365–1371.
- **Prado , F., Boero, C., Gallardo, M., Gonzalez, J. (2000).** Effect of NaCl on germination, growth and soluble sugar content in *Chenopodium quinoa* Willd. Seeds, *Botanical Bulletin of Academia Sinica* 41. pp: 27-34.
- **Prasad, MNV ., Greger, M., Landberg, T. (2001).** *Acacia nilotica* L. bark removes toxic metals from solution: corroboration from toxicity bioassay using *Salix viminalis* L. in hydroponic system. *International Journal of Phytoremediation.* **3**, 289-300.
- **Prasad, MNV. (1999).** Heavy metal stress in plants: from biomolecules to ecosystems. Springer- Verlag, Berlin-Heidelberg. p 462.
- **Prasad , MNV., Hagemeyer, F. (1999).** Heavy Métal Stress in Plants: From Molécules to Ecosystems. Berlin, Springer-Verlag.
- **Prasad , MNY., Drej ,K., Skawinska, A., Stratka, K. (1998).** Toxicity of cadmium and copper in *Chlamydomonas reinhardtii* wild-type (WT 2137) and cell wall deficient mutant strain (CW 15). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology.* 60 (2), 306-311.
- **Prasad, M.N.V., Hagemeyer, J. (1999).** Heavy metal stress in plants. From molecules to ecosystems. Springer. 401 p.
- **Qasim, AA. (1998).** Effect of salinity on growth, proline accumulation and chlorophyll content during vegetative growth, flowering and seed formation of *Brassica juncea* L. J. King Saud Univ. Agricultural Science. **10**, 145-152.
- **R'him. (2013).** Effet du stress salin sur le comportement physiologique et métabolique de trois variétés de piment (*Capsicum annum* L.) *J Appl Biosci* **66**, 5060 – 5069.

Références Bibliographiques

- **Rabe, E. (1999).** Altered nitrogen metabolism under environmental stress conditions. In: M. Pessaraki, ed. Handbook of Plant and Crop Stress. 2nd edn. pp. 349–363.
- **Rahdari, P., Tavakoli, S., Hosseini, S.M. (2012).** Studying of salinity stress effect on germination, proline, sugar, protein, lipid and chlorophyll content in Purslane (*Portulaca oleracea* L.) Leaves. *J Stress Physiol Biochem* **8(1)**: 182–193.
- **Rahdari, P., Tavakoli, S., Hosseini, SM. (2012).** Studying of salinity stress effect on germination, proline, sugar, protein, lipid and chlorophyll content in Purslane (*Portulaca oleracea* L.) Leaves. *J Stress Physiol Biochem* **8(1)**: 182–193.
- **Rahim Guealia, H. (2019).** Réponses hydriques et physiologiques du gombo (*Abelmoschus esculentus* L.) conduit sur substrat bentonisé sous contrainte saline. Thèse de doctorat de l'université Abdelhamid Ben Badis- Mostaganem, Algérie.
- **Rahman, SH., Khanam, D., Adyel, TM., Islam, MS., Ahsan, MA., Akbor, MA. (2012).** Assessment of heavy metal contamination of agricultural soil around Dhaka Export Processing Zone (DEPZ), Bangladesh: implication of seasonal variation and indices. *Appl Sci* **2(3)**, 584– 601. <https://doi.org/10.3390/app2030584>.
- **Rahoui, S., Chaoui, A., Ferjani, E. (2008).** Differential sensitivity to cadmium in germinating seeds of three cultivars of faba bean (*Vicia faba* L.). *Acta Physiol. Plant.* **30(4)**:451- 456.
- **Rasanen, LA. (2002).** Biotic and abiotic factors influencing the development of N₂-fixing symbioses between rhizobia and the woody legumes Acacia, pp 80.
- **Rashid, A., Jabeen, N., Batool, A., Ahmad, R. (2016).** Comparison of cadmium and zinc accumulation in onion and radish irrigated with municipal wastewater. *J Appl Agri Biotechnol* **1**, 47-53.

Références Bibliographiques

- **Rastgoo Leila., Alemzadeh., Abbas. (2011).** Biochemical Responses of Gouan ('*Aeluropus littoralis*') to Heavy Metals Stress. *Australian Journal of Crop Science.* **5(4)**, 375-383.
- **Reichman, SM. (2002).** The responses of plants to metal toxicity: a review focusing on copper, manganese and zinc. The Australian Minerals Energy and Environment Foundation, 54 p.
- **Rejili, M ., Neffati, N ., Mouhhamed, V. (2006).** Comportement germinatif de deux populations de *Lotus creticus*. L en présence du NaCl. *Revue des régions Arides* n° 17. 65.
- **Ren , FC., Liu, TC., Liu, HQ., Hu ,BY. (1993).** Influence of zinc on the growth, distribution of elements, and metabolism of one-year-old American ginseng plants. *Journal of Plant Nutrition.* **16(2)**, 393 405.
- **Rengasamy, P. (2006).**World salinization with emphasis on Australia .*Journal of Experimental Botany.* **57,** (5), p.1017-1023. Rep. 5: 11433. <https://doi.org/10.1038/srep11433>.
- **Reta Sanchez, DG., Santos Serrato Corona J., Viramontes RF., Cueto Wong JA., Padilla SB., César, JS. (2008).** Cultivos alternativos con potencial de uso forrajero en la comarca lagunera, Primera, Mexico, pp. 41.review, 110p.
- **Rhodes, D., Hanson, AD. (1993).** Quaternary ammonium and tertiary sulfonium compounds in higher plants. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* **44,** 357-384.
- **Rodriguez, E., da Conceição, SM., Azevedo, R., Correia, C., Moutinho-Pereira, J., Ferreira de Oliveira, J.M.P., Celeste Dia, M. (2015).** Photosynthesis light-independent reactions are sensitive biomarkers to monitor lead phytotoxicity in a Pb-tolerant *Pisum sativum* cultivar. *Environ Sci Pollut Res* (2015) **22:**574–585. DOI 10.1007/s11356-014-3375-9.

- **Rosa, M., Prado, C., Podazza, G. (2009).** Soluble sugars Metabolism, sensing and abiotic stress: A complex network in the life of plants. *Plant Signal Behav* **4(5)**, 388-393
- **Rucinska-Sobkowiak, R. (2016).** Water relations in plants subjected to heavy metal stress. *Acta Physiol. Plant.* 38, 257.
- **Saad, R. (1997).** Effect of atmospheric carbon dioxide levels on nitrogen uptake and metabolism in red kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.) under salt and water stress. PhD dissertation, University of Arizona; University Microfilms, Ann Arbor, MI. Diss Abstr B **40**, 4057.
- **Sabatini, AG., Marcazzan, GL., Caboni, MF., Bogdanov, S., Bicudo de Almeida-Muradian, L. (2009).** Quality and standardisation of Royal Jelly. *J ApiProd ApiMed Sci* **1(1)**, 1-6 DOI: 10.3896/IBRA.4.1.01.04.
- **Sacher, RF., Staples, RC. (1984).** Chemical microscopy for study of plants in saline environments. In: R.C. Staples and G.H.Toenniessen (eds.), *Salinity tolerance in plants: Strategies for crop improvement.* John Wiley and Sons, New York, pp. 17-35.
- **Saiema Rasool, Asiya, H., Azooz, MM., Muneeb-u-Rehman., Siddiqi, TO., Parvaiz, A. (2013).** Salt Stress: Causes, Types and Responses of Plants Ecophysiology and Responses of Plants under Salt Stress ISBN 978-1-4614-4746-7 ISBN 978-1-4614-4747-4 (eBook) DOI 10.1007/978-1-4614-4747-4.
- **Saiema Rasool., Asiya, H., Azooz, M M., Muneeb-u-Rehman., Siddiqi, TO., Parvaiz, A. (2013).** Salt Stress: Causes, Types and Responses of Plants Ecophysiology and Responses of Plants under Salt Stress ISBN 978-1-4614-4746-7 ISBN 978-1-4614-4747-4 (eBook) DOI 10.1007/978-1-4614-4747-4
- **Sairam, RK., Tyagi, A. (2004)** .Physiology and molecular biology of salinity stress tolerance in plants. *Current Science*, Vol. 86 (3), 10: 407-421.

Références Bibliographiques

- **Saraswat, S., Rai, J.P.N. (2011).** Complexation and detoxification of Zn and Cd in metal accumulating plants. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol*, 10: 327-339.
- **Sauvé, S., McBride, M., Norvell, W., Hendershot, W. (1997).** Copper solubility and speciation of in situ contaminated soil: effects of copper level, pH and organic matter. *Water, Air and Soil Pollution*. 133-149.
- **Schöffl, F., Baumann, G., Raschke, E., Bevan, M. (1986).** The expression of heat shock genes in higher plants. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* **B314**, 453–468.
- **Sela, M., Tel-Or, E., Fritz, E., Huttermann, A. (1988).** Localization and Toxic Effects of Cadmium, Copper, and Uranium in *Azolla*. *Plant Physiol.* 88(1):30-36.
- **Seregin, I., Kozhevnikova, A. (2005).** Physiological role of nickel and its toxic effects on higher plants, *Russian Journal of Plant Physiology*, **2**: 257-277.
- **Seregin, IV., Ivanov, VB. (2001).** Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants. *Russian Journal of Plant Physiology*. 48, 523-544.
- **Seth, CS. (2012).** A review on mechanisms of plant tolerance and role of transgenic plants in environmental clean-up. *Bot Rev* **78**, 32–62.
- **Sgherri, C., Quartacci, MF., Navari-Izzo, F. (2007).** Early production of activated oxygen species in root apoplast of wheat following copper excess. *Journal of Plant Physiology*. **164(9)**, 1152-1160.
- **Shabbir, Z., Sardar, A., Shabbir, A., Abbas, G., Shamshad, S., Khalid, S., Natasha, N., Murtaza, G., Dumat, C., Shahid, M. (2020).** Copper uptake, essentiality, toxicity, detoxification and risk assessment in soil-plant environment, *Chemosphere*. 259, 127436. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127436>.
- **Shabbir, Z., Sardar, A., Shabbir, A., Abbas, G., Shamshad, S., Khalid, S., Natasha, N., Murtaza, G., Dumat, C., Shahid, M. (2020).** Copper uptake, essentiality, toxicity,

Références Bibliographiques

detoxification and risk assessment in soil-plant environment, *Chemosphere*. 259, 127436.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127436>.

- **Shannon, MC., Grieve, CM. (1999).** Tolerance of vegetable crops to salinity. *Scientia Horti*. 78, 5-38.
- **Sharma, P., Dubey, RS. (2005).** Lead toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*. 17, 35-52.
- **Sharmila, P., Pardha Saradhi, P. (2002).** Proline accumulation in heavy metal stressed plants : An adaptative strategy. In: *Physiology and Biochemistry of Metal Toxicity and Tolerance in Plants*. Prasad M. N. V. et Strzalka K. (Eds), 179-199.
- **Sheng, M., Tang, H., Chan, B., Yang, F., Zhang, Y., Huang. (2008).** Influence of arbuscular mycorrhizae on photosynthesis and water status of maize plants under salt stress. *Mycorrhiza* 18, pp. 287-296 .DOI : [10.1007/s00572-008-0180-7](https://doi.org/10.1007/s00572-008-0180-7) .
- **Shilpi et Narendra., (2005).** Cold salinity and drought stress .*Archive of biochemistry biophysics* Vol, 44, 2: 139-158.
- **Shiyab, S. (2018).** Phytoaccumulation of Copper from Irrigation Water and Its Effect on the Internal Structure of Lettuce. *Agriculture*.8: 29.
<https://doi.org/10.3390/agriculture8020029>.
- **Shweti., Kumar, A., Chaudhry, AK. (2016).** Physiological responses and toxic effects of nickel (Ni) on cereals. *Int J Sci Res* 5, 491-495.
- **Sidhu ,GPS., Singh, HP., Batish, DR., Kohli, RK. (2017).** Tolerance and hyper-accumulation of cadmium by a wild unpalatable herb *Coronopus didymus* (L.) Sm. (Brassicaceae). *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 135, 209-215.

Références Bibliographiques

- **Singh ,S., Saxena, R., Pandley, K., Bhatt, K., Sinha ,S. (2004).** Response of antioxidants in sunflower (*Helianthus annuus* L.) grown on different amendments of tannery sludge: its metal accumulation potential. *Chemosphere*. **56**, 1663-1673.
- **Singh, R., Gautam N., Mishra A., Gupta, R .(2011).** Heavy metals and living systems: An overview. *Indian J Pharmacol* 43:246–53. doi: 10.4103/0253-7613.81505.
- **Singleton, V.L., Ross, J.R. (1965).** Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic – phosphothungstic acid. *Am. J. Enol. Vitic*, Vol. 16 : 144–158.
- **Sinha, S. (1999).** Accumulation of Cu, Cd, Cr, Mn and Pb from artificially contaminated
- **Sirhindi, G., Sharma P., Singh A., Kaur H., Mir, M. (2015).** Alteration in photosynthetic pigments, osmolytes and antioxidants in imparting copper stress tolerance by exogenous jasmonic acid treatment in *Cajanus cajan*. *International Journal of Plant Physiology and Biochemistry*. 7: 30-39. doi: 10.5897/IJPPB2015.0228.
- **Sivasankar, R., Kalaikandhan, R., Vijayarengan, P. (2012).** Phytoremediating capability of four plant species under zinc stress. *International Journal of Research in Environmental Science and technology*, **2 (1)**, 1-9.
- **Smolders, E., Lambregts, R. M., McLaughlin, M. J., Tiller K. G. (1998).**Effect of soil solution chloride on cadmium availability to Swiss chard. *J. Environ. Qual.* 27: 426-431.
- **Snoussi, SA., Halitim, A., Valles, V. (2004).**Absorption hydrique en milieu salin chez la tomate et le haricot. *Agriculture*, 13, (3), p.283-287.
- **Sobkowiak, R., Deckert, J. (2003).** Cadmium-induced changes in growth and cell cycle gene expression in suspension-culture cells of soybean. *Plant Physiology and Biochemistry*. **41**, 767-772.
- **Sofo, A., Dichio, B., Xiloyannis, E., Massia, A.(2004).** Effects of different irrachiance levels on some antioxidant enzymes and on malondialdehyde content during dewatering in

Références Bibliographiques

- olive tree, plant. Science 166, p 293-303. soil by Bacopa monnieri. *Environ. Monit. Assess.*, 57: 253-264.
- **Sonmez, S. (2007).** Effect of copper applications to soil on growth and mineral contents of tomato plants. *Asian Journal of Chemistry*. **19(3)**, 2151-2160.
 - **Sonmez, S., Kaplan, M., Sonmez, NK. Kaya, H., Uz, I. (2006).** High level of copper application to soil and leaves reduce the growth and yield of tomato plants. *Scientia Agricola*. (Piracicaba, Brazil). **63(3)**.
 - **Souguir, D., Ferjani, E., Ledoigt, G., Goupil, P. (2008).** Exposure of *Vicia faba* and *Pisum sativum* to copper-induced genotoxicity. *Protoplasma* 233(3):203-207.
 - **Spadini, L., Schindler PW., Charlet L., Manceau A., Ragnarsdottir, KV. (2003).** Hydrous ferric oxide: evaluation of Cd–HFO surface complexation models combining CdK EXAFS data, potentiometric titration results, and surface site structures identified from mineralogical knowledge. *Journal of Colloid and Interface Science*, 266, 1-18.
 - **Sposito , G. (1989).** The chemistry of soils. Oxford University Press, New York.
 - **Steinkellner, H., Mun-Sik, K., Helma, C., Ecker, S., Ma, TH., Horak, O., Kundi, M., Knasmüller, S. (1998).** Genotoxic effects of heavy metals: Comparative investigation with plant bioassays. *Environ. Mol. Mutag.* 31(2):183-191.
 - **Stevenson, F J. (1994).** Humus chemistry: Genesis, composition, reactions. Wiley, New York. 512 p.
 - **Stoddard, FL., Nicholas AH., Rubiales, D., Thomas, J., Villegas-Fernández, AM. (2010).** Integrated pest management in faba bean. *Field Crops Res.* 115: 308–318. doi: 10.1016/j.fcr.2009.07.002.
 - **Subba, P., Mukhopadhyay, M., Mahato, SK., Bhutia, KD., Mondal, TK., Ghosh, SK. (2014).** Zinc stress induces physiological, ultra-structural and biochemical changes in

Références Bibliographiques

- mandarin orange (*Citrus reticulata* Blanco) seedlings. *Physiol Mol Biol Plants* **20(4)**, 461–473.
- **Sultana, N., Ikeda, T., Itoh, R. (1999).** Effect of NaCl salinity on photosynthesis and dry matter accwnulation in developing rice grains. *Environ Exp Bot* **42**, 211-220.
 - **Sun ,B., Kan, SH., Zhang, YZ., Deng, SH., Wu ,J., Yuan ,H., Qi ,H., Yang, G., Li, L., Zhang ,XH., Xiao, H., Wang, YJ., Peng, H., Li, YW. (2010).** Certain antioxidant enzymes and lipid peroxidation of radish (*Raphanus sativus* L.) as early warning biomarkers of soil copper exposure. *Journal of Hazardous Materials*. **183**, 833-838.
 - **Sytar, O., Kumar, A., Latowski, D., Latowski, D., Kuczynska, P., Strzalka, K., Prasad, M N V. (2013).** Heavy metal-induced oxidative damage, defense reactions, and detoxification mechanisms in plants. *Acta Physiol Plant*. **35**, 985–999. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-1169-6>.
 - **Tahri, M. (2018).** Research of parameters related to salt tolerance in beans (*Phaseolus vulgaris* L.) PhD thesis from Mostaganem University of Algeria, pp:70-78.
 - **Tamás, MJ., Sharma SK., Ibstedt S., Jacobson T., Christen, P.(2014).** Heavy metals and metalloids as a cause for protein misfolding and aggregation. *Biomolecules*. 4: 252–267. doi:10.3390/biom4010252.
 - **Tanhan, P., Kruatrachue, M., Pokethitiyook, P., Chaiyarat, R. (2007).** Uptake and accumulation of cadmium, lead and zinc by siam weed [*Chromolaena odorata* (L.) King & Robinson]. *Chemosphere*, 68: 323-329.
 - **Tanno, K., Willcox G. (2006).** The origins of cultivation of *Cicer arietinum* L. and *Vicia faba* L.: early finds from Tell el-Kerkh, north-west Syria, late 10th millennium B.P. *Veget. Hist. Archaeobot*. 15:197-204.

Références Bibliographiques

- **Tardieu, F., Dreyer, E. (1997).** Régulation des échanges gazeux par les plantes soumises à la sécheresse. In *L'eau dans l'espace rural*. Production végétale et qualité de l'eau. Ed INRA, 41-59.
- **Tchounwou, PB., Yedjou, CG., Patlolla, AK., Sutton, DJ., (2012).** Heavy metals toxicity and the environment. *EXS* **101**, 133-164.
- **Templeton, AR., Weiss, KM., Nickerson, DA., Boerwinkle, E., Sing CF. (2000b).** Cladistic structure within the human Lipoprotein lipase gene and its implications for phenotypic association studies. *Genetics*. **156**, 1259–1275.
- **Templeton, AR, Clark, AG, Weiss, KM. (2000a).** Recombinational and mutational hotspots within the human *Lipoprotein Lipase* gene. *American Journal of Human Genetics*. **66**, 69–83.
- **Tester, M., Davenport, R.J. (2003).** Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants. *Ann Bot (Lond.)* **91**, 503–527.
- **Thomas, F. (2008).** la féverole confirme son intérêt. Techniques culturales simplifiées n°48. 4ème édition. 102p.
- **Thomé, OW.(1885).** Flora von Deutschland, Österreich und der Schweiz Gera, Germany. http://www.biolib.de/thome/band3/tafel_132.html.
- **Toth, G., Hermann, T., Szatmari, G., Pasztor, L. (2016).** Maps of heavy metals in the soils of the European Union and proposed priority areas for detailed assessment. *Sci. Total Environ* **565**, 1054–1062.
- **Tremel-Schaub A, Feix I. 2005.** Contamination des sols : transferts des sols vers les plantes. EDP Sciences. p 413.

Références Bibliographiques

- **Trinchant, J.C., Boscari, A., Spennato, G., Van de Sype, G., Le Rudulier, D. (2004).** Proline betaine accumulation and metabolism in alfalfa plants under sodium chloride stress. Exploring its compartmentalization in nodules. *Plant Physiol*, 135(3), 1583-94.
- **Ure , AM., Davidson, CM. (2007).** Chemical speciation in soils and related materials by selective chemical extraction. In: *Chemical Speciation in the Environment*. Eds Ure AM, Davidson CM, Blackwell Science, London. 265-300.
- **Uzu, G., Sobanska, S., Sarret, G., Muñoz, M. & Dumat, C. (2010).** Foliar Lead Uptake by Lettuce Exposed to Atmospheric Fallouts. *Environmental Science & Technology*, 44 (3) 1036-1042. DOI: 10.1021/es902190u
- **Valentina, K., Kirill, V., Vladimir, K. (2010).** Plants Under Heavy Metal Stress in Saline Environments. Sherameti I. and Varma A. (eds.), *Soil Heavy Metals, Soil Biology* **19**, DOI 10.1007/978-3-642-02436-8_8
- **Viard, B., Maul, A., Pihan, J.C. (2004).** Standard use conditions of terrestrial gastropods in active biomonitoring of soil contamination. *J. Environ. Monit*, 6: 103-107.
- **Vijayarengan P. 2012.** Growth and biochemical variations in radish under zinc applications. *International Journal of Plant Sciences*. **2(3)**, 43-49.
- **Vincent, R. (2006).** Recherche et étude de marqueurs moléculaires de la réponse au stress chez l'algue brune *Laminariadigitata*. Thèse de doctorat. Biologie. Université de Rennes 1. 237pp.
- **Vinit-Dunand, F., Epron, D., Alaoui-Sosse ,B., Badot, P.M. (2002).** Effects of copper on growth and on photosynthesis of mature and expanding leaves in cucumber plants. *Plant Science*. **163**, 53-58.

Références Bibliographiques

- **Von Wiren, N., Romheld, V., Shioiri, T., Marschner, H. (1995).** Competition between microorganisms and roots of barley and sorghum for iron accumulated in the root apoplast. *New Phytologist*, 130, 511-521.
- **Vulkan, R., Zhao, FJ., Barbosa-Jefferson, V., Preston, S., Paton, G.I., McGrath, S.P. (2000).** Copper speciation and impacts on bacterial biosensors in the pore water of copper contaminated soils. *Environmental Science and Technology*, 34, 5115-5121.
- **Walton, N.J., Brown, D.E. (1999).** Chemicals from plants, Perspectives on secondary products, *World Scientific*. 56-66.
- **Wang, Y., Nil, N. (2000).** Changes in chlorophyll, ribulose biphosphate carboxylase–oxygenase, glycine betaine content, photosynthesis and transpiration in *Amaranthus tricolor* leaves during salt stress. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 75, 623–627.
- **Wang, HF., Zong XX., Guan JP., Yang T., Sun XL., Ma Y., Redden, R. (2012).** Genetic diversity and relationship of global faba bean (*Vicia faba* L.) germplasm revealed by ISSR markers. *Theor Appl Genet.* 124: 789-797.
- **Wang, J., Chen, C. (2006).** Biosorption of heavy metals by *Saccharomyces cerevisiae*: A review. *Biotechnol. Adv.* 24, 427–451. doi:10.1016/j.biotechadv.2006.03.001.
- **Wang, Y., Nil, N. (2000).** Changes in chlorophyll, ribulose biphosphate carboxylase–oxygenase, glycine betaine content, photosynthesis and transpiration in *Amaranthus tricolor* leaves during salt stress. *J Hortic Sci Biotechnol* 75, 623–627.
- **Wang, Y., Xu, L., Shen, H., Wang, J., Liu, W., Zhu, X., Wang, R., Sun, X., Liu, L. (2015).** Metabolomic analysis with GC-MS to reveal potential metabolites and biological pathways involved in Pb & Cd stress response of radish roots. *Sci Rep* 5:18296.
- **Waśkiewicz, A., Muzolf-Panek, M., Goliński, P. (2013).** Phenolic Content Changes in Plants Under Salt Stress in Parvaiz Ahmad M.M. Azooz M.N.V. Prasad Editors

Ecophysiology and Responses of Plants under Salt Stress ISBN 978-1-4614-4747-4
(eBook)

- **Wheeler, DM., Power, IL. (1995).** Comparison of plant uptake and plant toxicity of various ions in wheat. *Plant and Soil* 172,163-173.
- **Whitby, H., Posacka, AM., Maldonado, MT., van den Berg, CMG. (2018).** Copper-binding ligands in the NE Pacific. *Marine Chemistry*. 204: 36-48.
- **White ., Michael, C., Fred ,D., Baker, Rufus, L., Chaney., A., Morris Decker. (1981).** «Metal complexation in xylem fluid II. Theoretical equilibrium model and computational computer program ». *Plant Physiology* 67 (2): 301–310.
- **Wiebe, BH., Eilers, RG., Eilers ,WG., Brierley ,T.(2001).** Development of risk indicator for drylandsalinisationon the Canadian prairies. *Proceeding of the Internation Salinity Forum*, p.473-476.
- **Winkel-Shirley, B. (2002).** Biosynthesis of flavonoids and effects of stress. *Curr opin plant biol* 5(3), 218-223.
- **Wong, CC., Li, HB., Cheng, KW., Chen, F. (2006).** A systematic survey of antioxidant activity of 30 Chinese medicinal plants using the ferric reducing antioxidant power assay. *Food Chem*, Vol. 97: 705-711.
- **Wu, CF., Luo, YM., Zhang, LM. (2011).**Variability of copper availability in paddy fields in relation to selected soil properties in southeast China. *Geoderma*, 156: 200-206.
- **Wu, F., Zhang, G., Dominy, P., Wu, H., Bachir, DML. (2015).** Differences in yield components and kernel Cd accumulation in response to Cd toxicity in four barley genotypes. *Chemosphere* 70(1), 83-92.

- **Xiong, TC., Ronzier, E., Sanchez, F., Corratagé-Faullie, C., Mazars, C., Thibaud, JB. (2014).** Imaging long distance propagating calcium signals in intact plant leaves with the BRET-based GFP-aequorin reporter. *Front Plant Sci.* **5**, 43-45.
- **Xiong, Z., Zhao, F., Li, M. (2006).** Lead toxicity in *Brassica pekinensis* Rupr: effect on nitrate assimilation and growth. *Environmental Toxicology.* **21(2)**, 147-153.
- **Xuan ,Y., Scheuermann ,EB., Meda ,AR., Hayen ,H., Von Wiren, N., Weber, G. (2006).** Separation and indentification of phytosiderophores and their metal complexes in plants by zwitterionic hydrophilic interaction liquid chromatography coupled to electrospray ionization mass spectrometry. *Journal of Chromatography*, 1136, 73-81.
- **Yang, X., Feng, Y., He, Z., Stoffella. (2005).** Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation and phytoremediation. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 18 : 339 - 353.
- **Yang, ZP., Lu, WX., Long, YQ., Bao, XH., Yang, QC. (2011).** Assessment of heavy metals contamination in urban topsoil from Changchun City, China. *J. Geochem. Explor.*, 108:27-38.
- **Yildiz, M., Cigerci, IH. Konuk, M., Fatih Fidan, A., Terzi, H. (2009).** Determination of genotoxic effects of copper sulphate and cobalt chloride in *Allium cepa* root cells by chromosome aberration and comet assays. *Chemosphere* 75(7):934-938.
- **Zaghouane, K.(2001).** The situation of Faba bean (*Vicia faba* L.) in Algérie. Options méditerranéennes. Present statut and future perspects of faba bean production, I.C.A.R.D.A. Serie A, N0 10. 123-125p.

Références Bibliographiques

- **Zhao, J., Sykacek P., Bodner G., Rewald, B. (2018).** Root traits of European *Vicia faba* cultivars – Using machine learning to explore adaptations to agroclimatic conditions. *Plant Cell Environ.* 41:1984-1996. doi: 10.1111/pce.13062 [Epub ahead of print].
- **Zhao, JW., Ren, D., Zhi, L., Wang., Xia, G. (2007).** *Arabidopsis* DREB1A/CBF3 bestowed transgenic tallfescue increased tolerance to drought stress. *Plant Cell Rep* **26(9)**, 1521–1528.
- **Zhishen, J., Mengcheng, T., Jianming, W. (1999).** The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food Chem.*, Vol. 64 (4) : 555- 559.
- **Zhu, JK. (2001).** Plant salt tolerance. *Trends in plant Science*, 6: 66-71.
- **Zhu, JK. (2002).** Salt and drought stress signal transduction in plants. *Annu Rev Plant Biol* **53**, 247-273. Available on: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3128348/>
- **Zid, E., Boukhris, M. (1977).** Quelques aspects de la tolérance de l'*Atriplex halimus* au chlorure de sodium. Multiplication, croissance, composition minérale. *Oecol. Plant.***12**, 351–362.
- **Zourgui, M. (2012).** Action combinée de la bentonite et de la salinité sur les paramètres hydriques, biochimiques et minéraux chez le radis (*Raphanus sativus* L.) thèse de magister de l'université Abdelhamid Ben Badis- Mostaganem, Algérie.
- **Zourgui, M. (2012).** Action combinée de la bentonite et de la salinité sur les paramètres hydriques, biochimiques et minéraux chez le radis (*Raphanus sativus* L.) mémoire de Magister, Université AbdelhamidIbn Badis Mostaganem. Algérie.

Références Bibliographiques

Annexe

Annexe 01 : Références de la classification du sol (US Département of Agriculture)**Tableau 01** : Classes de la capacité d'échange cationique et de la salinité dans le sol

CEC meq/100g	Interprétation	CE (dS/m)	Interprétation
CEC<9	Faible CEC	0 - 2	Non salin
9≤CEC≤12	CEC moyenne	2 - 4	Salinité faible
12<CEC≤15	CEC assez élevée	4 - 8	Salinité modérée
15<CEC≤25	CEC élevée	8 - 16	Salinité forte
CEC>25	CEC très élevée	16 - 32	Salinité sévère

Tableau 02 : Classes du calcaire et de la matière organique dans le sol

CaCO ₃ total	Interprétation	Matière organique (%)	Interprétation
CaCO ₃ ≤5%	non calcaire	MO<1	Très pauvre
5<CaCO ₃ ≤12,5%	faiblement calcaire	1<MO≤2	Pauvre
12,5<CaCO ₃ ≤25%	modérément calcaire	2<MO≤3	Moyenne
25<CaCO ₃ ≤50%	fortement calcaire	MO>4	Riche

Tableau 03 : Classes texturales du sol

Texture du sol	Sable	Limon (silt)	Argile	Classe texturale
Sol sableux (texture grossières)	86-100	00-14	00-10	Sable
	70-86	00-30	00-15	Sable limoneux
Sol limoneux (modérément grossières)	50-70	00-50	00-20	Limon sableux
Sol limoneux (texture moyenne)	23-52	28-50	07-27	Limon
	20-50	74-88	00-27	Limon silteux
	00-20	88-100	00-12	Limon très fin (silt)
Sol limoneux (modérément fine)	20-45	15-52	27-40	Limon argileux
	45-80	00-28	20-35	Limon sablo-argileux
	00-20	40-73	27-40	Limon silto-argileux
Sol argileux (texture fine)	45-65	00-20	35-55	Argile sableuse
	00-20	40-60	40-60	Argile silteuse
	00-45	00-40	40-100	Argile

Annexe 02 : Caractéristiques du terreau.

Caractéristiques	Valeurs
Matière organique	70 / 80 % de la matière sèche
Matière sèche	40 / 50 % du produit brute
Porosité totale du volume	80 % v/v
Humidité	Min 40% - Max 60%
pH eau	4.5 – 7.5
Conductivité électrique	0.7 dS/m
Sel (H ₂ O)	< 1.5 g/l
Potassium	80 – 400 mg/l (K ₂ O)
Azote (CaCl ₂)	50 – 300 mg/l (N)
Phosphate	80 – 300 mg/l (P ₂ O ₅)

Annexe 3: Préparation des solutions stressantes

Tableau 01 : Préparation des solutions métalliques stressantes

Métal	Forme	Formule de la préparation des solutions métalliques
Cuivre	CuSO ₄ , 5H ₂ O	$Poids (g/l) = C (g/l) \cdot v(l) \cdot M \text{ CuSO}_4, 5\text{H}_2\text{O} (g/mol) / M_{Cu} (g/mol)$
Zinc	ZnSO ₄ , 7H ₂ O	$Poids (g/l) = C (g/l) \cdot v(l) \cdot M \text{ ZnSO}_4, 7\text{H}_2\text{O} (g/mol) / M_{Zn} (g/mol)$

Avec : (C) concentration ; (V) volume ; (M) masse molaire

Tableau 02 : Préparation des solutions salines stressantes

Sel	Forme	Formule de la préparation des solutions salines
Chlorure de sodium	NaCl	$Poids (g/l) = C \cdot V \cdot M \text{ NaCl}$

Avec : (C) concentration (mol/l) ; (V) valence de l'ion ; (M) masse molaire

Annexe 4: Capacité de rétention de l'eau

Calcul de la capacité de rétention CR pour 100g de sable

P0 poids pot de yaourt vide est 4.1 g.

P1 poids de sable 100 g.

P2 poids après 24h (après saturation) 124,3 g.

$$CR = (P2 - P1) - P0 = (124.3 - 100) - 4.1 = 20.2 \text{ g}$$

La capacité de rétention pour 100g de sable est égale 20.2 ml.

- **Calcul la capacité de rétention de l'eau pour le substrat (2V sable/V terreau=3000 g)**

20.2 ml → 100 g
 × → 3000 g
 × =606 ml

La capacité de rétention est égale de 606 ml pour 3000 g de substrat.

Annexe 05 : Courbes d'étalonnage du dosage des paramètres étudiés

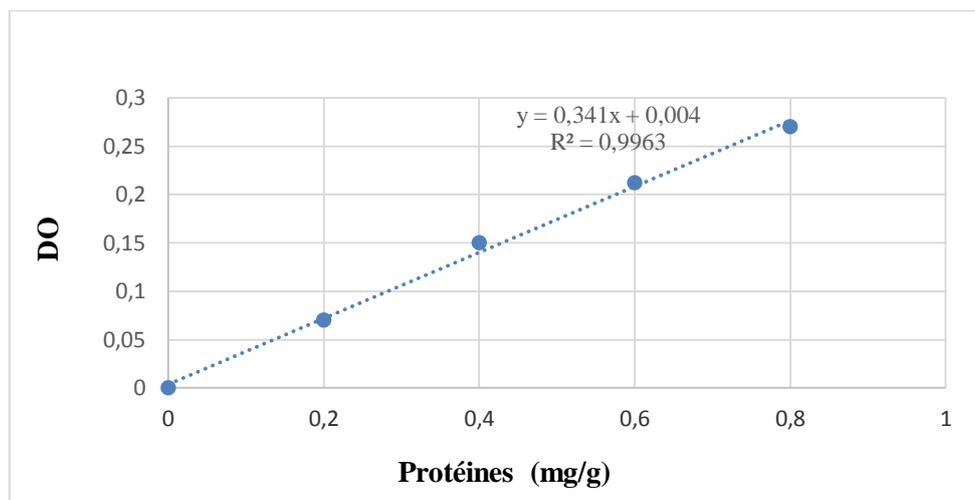


Figure 01 : Courbe d'étalonnage des protéines totales

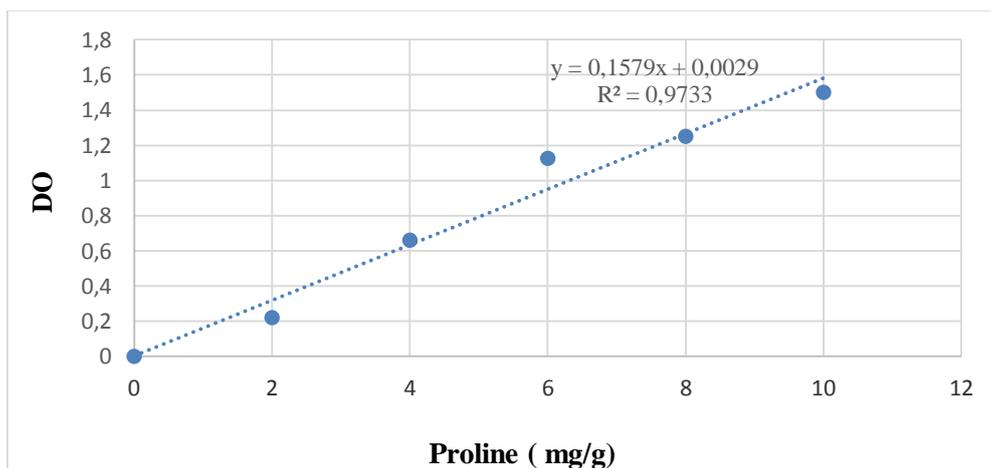


Figure 02 : Courbe d'étalonnage de la proline

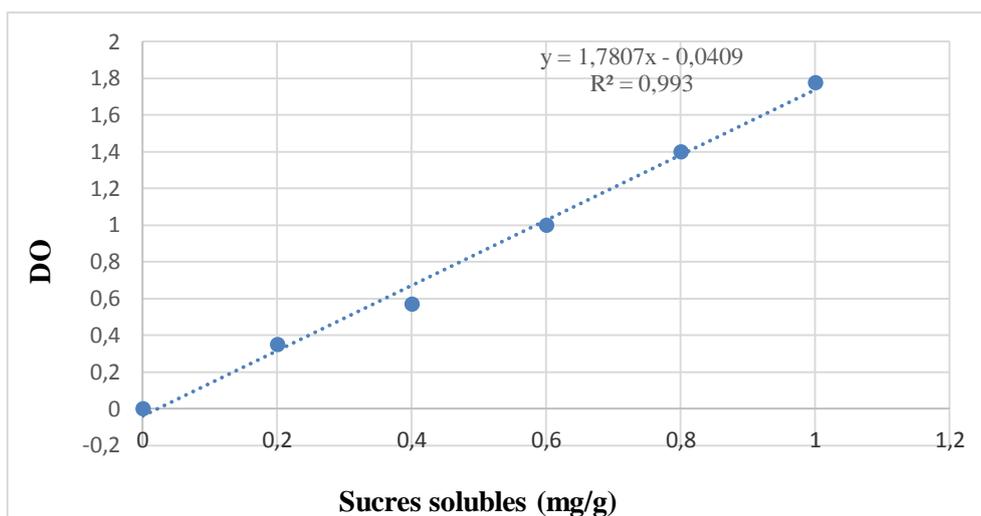


Figure 03 : Courbe d'étalonnage des sucres solubles

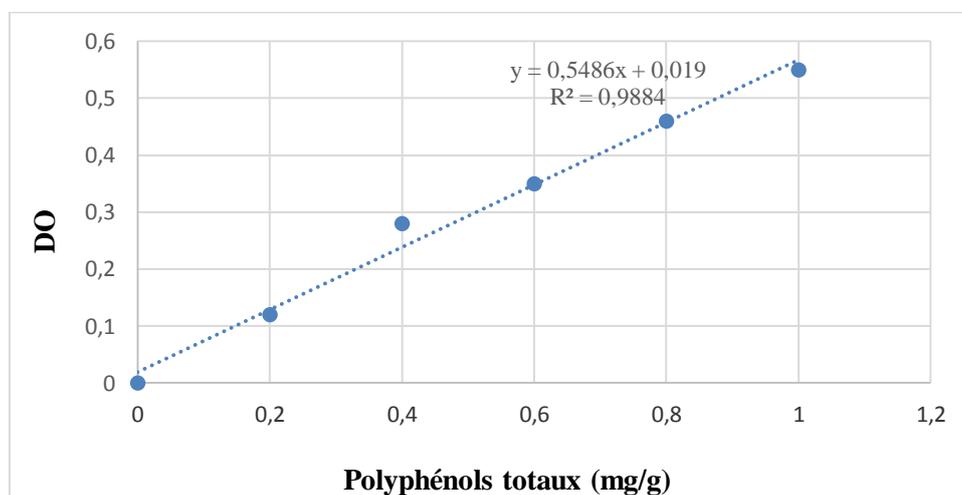


Figure 04 : Courbe d'étalonnage des Polyphénols totaux

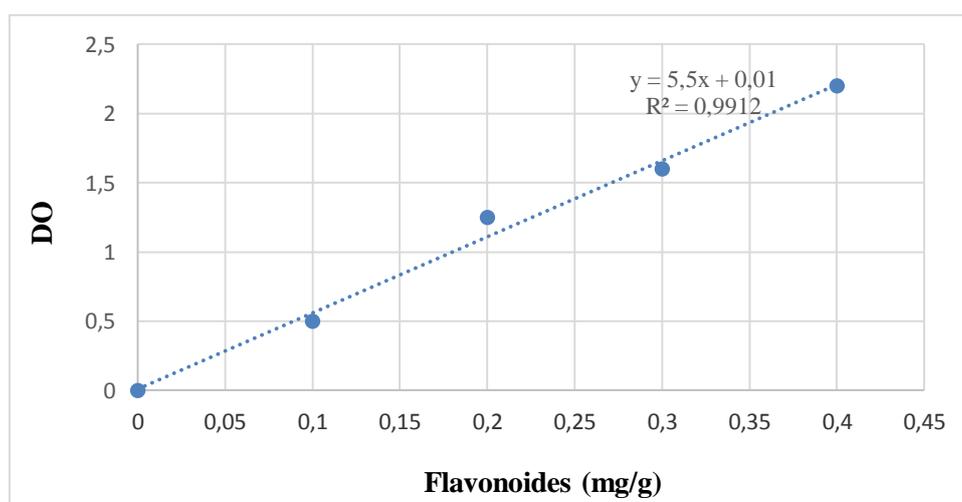


Figure 05 : Courbe d'étalonnage des flavonoïdes

Annexe 06 : Analyses statistiques de l'effet de NaCl, Cu et Zn sur les paramètres morpho-physiologiques de *Vicia faba* L.

Paramètres	Facteur Métal	F1*NaCl		F2*Métal		Interaction F1*F2	
		Test F	Prob	Test F	Prob	Test F	Prob
Nombres des feuilles	Cuivre			89,675	0	12,948	0
	Zinc	98,167	0	95,408	0	12,989	0
Longueur des tiges	Cuivre			78,65	0	30,562	0
	Zinc	69,238	0,00001	99,19	0	18,461	0
Longueur des racines	Cuivre			59,682	0	28,826	0
	Zinc	83,306	0	11,967	0,00071	6,484	0,00012
Poids frais PA	Cuivre			50,632	0	6,456	0,00012
	Zinc	99,118	0	64,253	0	7,223	0,00005
Poids frais PR	Cuivre			56,251	0	5,521	0,00041
	Zinc	251,49	0	111,39	0	13,103	0
Poids sec PA	Cuivre			26,237	0,00002	8,578	0,00001
	Zinc	35,744	0,00008	47,744	0	14,108	0
Poids sec PR	Cuivre			27,32	0,00002	5,177	0,00066
	Zinc	21,693	0,00044	30,896	0,00001	5,611	0,00037
Teneur relative en eau	Cuivre	18,603	0,00074	21,28	0,00006	5,887	0,00025
	Zinc			27,383	0,00002	10,996	0

Annexe 07 : Analyses statistiques de l'effet de NaCl, Cu et Zn sur les paramètres biochimiques de *Vicia faba* L.

Paramètres	Facteur Métal	F1*NaCl		F2*Métal		Interaction F1*F2	
		Test F	Prob	Test F	Prob	Test F	Prob
Chlorophylle (a)	Cuivre			267,94	0	110,584	0
	Zinc	1574,161	0	493,01	0	229,406	0
Chlorophylle (b)	Cuivre			45,73	0	24,513	0
	Zinc	71,649	0,00001	42,925	0	25,754	0
Chlorophylle (totale)	Cuivre			697,08	0	229,96	0
	Zinc	1088,931	0	737,166	0	271,271	0
Proline PA	Cuivre			139,771	0	34,301	0
	Zinc	215,252	0	472,359	0	57,862	0
Proline PR	Cuivre			97,666	0	75,453	0
	Zinc	340,312	0	307,418	0	38,564	0
Protéine PA	Cuivre			41,941	0	8,819	0,00001
	Zinc	27,84	0,00019	104,219	0	9,223	0
Protéine PR	Cuivre			75,2	0	12,498	0
	Zinc	22,831	0,00037	41,67	0	32,44	0
Sucres solubles PA	Cuivre			52,651	0	227,615	0
	Zinc	56,064	0,00002	307,682	0	47,82	0
Sucres solubles PR	Cuivre			17,687	0,00013	109,97	0
	Zinc	37,854	0,00007	247,837	0	96,336	0
Polyphénols Totaux PA	Cuivre			20,541	0,00007	9,394	0
	Zinc	36,49	0,00007	33,879	0,00001	6,572	0,0001
Polyphénols Totaux PR	Cuivre			45,308	0	7,023	0,00006
	Zinc	30,377	0,00014	11,181	0,00094	1,728	0,142

Flavonoïdes	Cuivre	151,584	0	13,749	0,00039	11,45	0
PA	Zinc			58,242	0	10,976	0
Flavonoïdes	Cuivre			12,182	0,00066	5,096	0,00074
PR	Zinc	23,715	0,00033	14,937	0,00028	3,786	0,0051