



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
جامعة باجي مختار - عنابة  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA

FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE BIOLOGIE

THESE EN VUE DE L'OBTENTION D'UN DIPLOME DE DOCTORAT

Spécialité: BIOLOGIE VEGETALE

Intitulé

**Effets de la toxicité d'un métal lourd, le plomb sur la germination, la croissance et le métabolisme de deux variétés de blé dur *Triticum durum* Desf.**

Presentée par : M<sup>me</sup> SLIMANI Soraya

**Membre de Jury:**

LADJAMA	Ali	Pr.	Président	Université Badji Mokhtar, Annaba
BOUDELAA	Mokhtar	Pr.	Dir. de thèse	Université Badji Mokhtar, Annaba
MEKSEM	Leila	Pr.	Examineur	Université Badji Mokhtar, Annaba
SOLTANE	Mahmoud	Pr.	Examineur	Université El Tarf
FADEL	Djamel	Pr.	Examineur	Université Chérif Messadia, Souk Ahras
ABDELMADJID	Saddek	M.C	Examineur	Université Chérif Messadia, Souk Ahras

Année universitaire: 2013/2014

*'Mieux vaut tard que jamais'*

***Dédicaces***

*Papa, je te dédie ce travail, j'espère que tu es fier de moi.*

*Je dédie également ce travail à ma mère,*

*à mon mari et à mes enfants*

## **AVANT PROPOS**

Au terme de cette étude, je voudrais remercier tous ceux et celles qui d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Tout d'abord, je tiens à adresser mes vifs remerciements à Monsieur le professeur Ali Ladjama, Directeur du laboratoire de Biochimie et Microbiologie Appliquée de l'université Badji Mokhtar, pour l'honneur qu'il me fait en présidant mon jury de soutenance.

Je ne saurais continuer sans exprimer ma profonde reconnaissance à mon directeur de thèse et mon compagnon de toujours, Monsieur Boudelaa Mokhtar Professeur au laboratoire de Biologie Végétale et Environnement de l'université Badji Mokhtar de Annaba, pour m'avoir aidée et guidée tout au long de ces années de recherche. Merci de m'avoir initiée à la physiologie végétale ainsi qu'aux rudiments de la biochimie.

J'adresse des remerciements particuliers à Madame Leila Amara Meksem, Professeur au laboratoire de Toxicologie Fondamentale de l'université Badji Mokhtar de Annaba, qui a bien voulu examiner ce travail. J'ai sollicité son concours car connaissant à la fois ses qualités pédagogiques et scientifiques. Je lui exprime donc, toute ma gratitude pour l'intérêt qu'elle a porté à mon travail.

J'apprécie beaucoup l'honneur que me font Messieurs Fadel Djamel et Abdelmadjid Saddek, Professeur et Maître de conférences à l'université Mohamed Cherif Messaadia de Souk Ahras, en acceptant d'examiner ce travail malgré leurs nombreuses préoccupations.

J'adresse également toute ma reconnaissance à Monsieur Mahmoud Soltane, Professeur au Département d'Agronomie de l'université d'El Tarf, pour avoir accepté de faire partie de ce jury de thèse en tant qu'examineur de ce travail de recherche.

Je ne peux oublier tous ceux de l'autre côté de la rive, ceux et celles qui rendent la vie plus légère et agréable, les chercheurs du laboratoire d'Ecologie Alpine de Grenoble (notre laboratoire d'accueil), à commencer par :

Le Professeur Patrick Ravannel Directeur du laboratoire pour sa facilité d'accueil, son hospitalité et ses coups de main multiples dans mon travail de recherche,

le Professeur Juliette Asta-Giacometti, pour sa gentillesse, son écoute et le temps qu'elle a consacré à mes nombreuses sollicitations scientifiques, techniques et autres « Tea-time »(ou quart d'heure culturel) Juliette avec le chocolat et Michel avec le café,

le Professeur Michel Tissut, pour son aide précieuse en physiologie végétale et en dépannage de toutes sortes.

Les Docteurs Stéphane Reynaud et Muriel Raveton, Maîtres de conférences au laboratoire d'Ecologie Alpine de l'université Joseph Fourier de Grenoble, pour leurs conseils avisés de chercheurs expérimentés.

De façon personnelle, je voudrais aussi remercier tous ceux qui en dehors de mon cercle familial m'ont soutenu depuis plus ou moins longtemps et qui m'ont aidé chacun à sa manière à mener ce travail à bien. Une pensée particulière à Wafa, un grand Merci pour ton amitié, ta présence et ton soutien inconditionnel.

Enfin, je ne peux clore ces remerciements sans adresser toute mon affection et ma reconnaissance à tous les membres de ma famille qui m'ont soutenue et encouragée. Merci à ma mère, à mon père, à ma sœur Meriem et mon frère Salah pour leur soutien, leurs encouragements permanents et leur disponibilité à chaque fois que j'en avais besoin.

Pour terminer, un grand merci à **Samy, Sofiane et Nassim**, mes chers enfants, de m'avoir aidée à tenir le coup et d'aller de l'avant.



**Liste d'Acronymes**

N°	Sigle	Signification
1	ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie
2	CNIS	Centre National de l'Informatique et des Statistiques
3	CIC	Centre International des céréales
4	CIMMYT	Centre International pour l'Amélioration du maïs et Blé
5	CNCC	Chambre nationale des cultures et des commerces
6	OAIC	Office Algérien Interprofessionnel des Céréales
7	ICARDA	Centre International de recherche et Développement Agricole des Régions Arides
8	ITGC	Institut Technique des Grandes Cultures
9	MADR	Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural

**Liste des Abréviations**

Abréviation	Signification
SAU	Surface Agricole utile
Ha	Hectare
CEC	Capacité d'échange cationique
CTE	Chaine de transport des électrons
ERO	Espèces réactives à l'oxygène
TCA	Acide trichloro acétique
BBC	Bleue de Coomassie
BSA	Sérum albumine bovine
PSF	Poids spécifique des feuilles
SF	Surface foliaire
MF	Matière Fraiche
MS	Matière sèche
RWC	Contenu d'eau relatif (Relative water content)
FW	Poids frais (Freshweight)
DR	Poids sec (Dry weight)
TW	Poids de turgescence (Turged weight)
EDTA	Ethylène Diamine Tétra acétique
CNDB	Chloro di nitrobenzoïque
DTNB	5,5-Dithio-bis (2-NitrobenzoicAcid)
APX	Ascorbate peroxydase
GPX	Gaïacol peroxydase
GSH	Glutathion
GSSG	Glutathion réduit
DKG	Acide 2,3-di kétogulonique

*Liste d'acronymes et abréviations*

---

POD	Peroxydase
POX	Autre forme de peroxydase
CAT	Catalase
SOD	Superoxyde dismutase
GST	Glutathion sulfotransférase
ADN	Acide désoxyribonucléique
ASC	Acide ascorbique
MDHA	Malonaldehyde déshydrogénase
DHA	Déhydroascorbate
PSI	Photosystème I
PSII	Photosystème II
Chl a	Chlorophylle (a)
Chl b	Chlorophylle (b)
Carot	Caroténoïdes
PC	Phytochélatine
PCS	Phytochélatine synthase
ETM	Elément Trace Métallique

## Liste des tableaux

N°	Titre	Page
1	Composition chimique du grain de blé d'après Feuillet 2000.	6
2	Teneur moyenne en éléments minéraux et vitamine en mg pour 100g de blé	7
3	Position systématique du blé	12
4	Liste des blés des Oasis et ou du Sahara mentionnés par Ducellier (1930)	13
5	Nomenclature des blés cultivés actuellement et leurs espèces apparentées, selon Van Slageren, (1994)	15
6	Echelle phénologique d'après Zadocks <i>et al.</i> , (1974)	16
7	Besoins des blés en éléments fertilisant N.P.K.	20
8	Liste des blés durs et tendres mentionnés par L'ITGC, (1995)	26
9	Variétés de blé dur et de blé tendre autorisées à la production et à la commercialisation par le CNCC(1998)	28
10	Sélections des blés durs et tendres mentionnés par Laumont et Roux (1961,1962)	32
11	Tableau des éléments périodiques de Mendeleïev	37
12	Principaux minéraux et composés de plomb (BRGM, 2004 in Cecchi, 2008)	38
13	Effets du plomb sur la concentration en éléments minéraux des parties aériennes et racinaires.	48
14	Principales caractéristiques agronomiques des variétés Gta et Vitron (Catalogue ITGC, 2004)	64
15	Caractéristiques physico-chimiques du sol utilisé dans l'expérimentation	76
16	Valeurs du F observé ( $F_{obs}$ ) de l'analyse de variance à 2 critères de classification des paramètres germinatifs et pigments photorécepteurs.	81
17	Valeurs du F observé ( $F_{obs}$ ) de l'analyse de variance à 2 critères de classification des marqueurs biochimiques et enzymatiques.	84
18	Valeurs du F observé ( $F_{obs}$ ) de l'analyse de variance à 2 critères de classification des autres paramètres étudiés de la germination	90
19	Valeurs moyennes des paramètres physiologiques étudiés dans l'essai de croissance sur sol	97
20	Valeurs du F observé ( $F_{obs}$ ) de l'analyse de variance à 2 critères de classification des paramètres de la croissance et pigments photorécepteurs	99

Liste des figures

N°	Titre	Page
1	Dessin d'un plant de blé	9
2	Morphologie de la fleur et d'un épillet	10
3	Coupe longitudinale d'un grain de blé montrant les différents constituants	11
4	Stades phénologiques d'une Graminée, le blé.	17
5	Répartition des précipitations dans le nord de l'Algérie	24
6	Cycle géochimique naturel et anthropique du plomb dans la nature	41
7	Les différentes voies de pénétration du plomb dans les cellules	44
8	Interaction du plomb dans la chaîne photosynthétique (d'après Pourrut, 2012)	50
9	Cycle de Calvin fixateur de carbone.	51
10	Schématisation de la balance entre les ERO et les antioxydants.	53
11	Différentes voies métaboliques d'élimination des ERO dans les végétaux.	55
12	Oxydation de deux molécules de GSH conduisant à l'établissement d'un pont Disulfure et la formation de GSSG.	61
13	Dispositif expérimental de l'essai de germination	65
14	Dispositif expérimental de l'essai de croissance	75
15	Effets du plomb sur le taux germination des graines de blé dans des solutions contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb.	79
16	Effets du plomb Longueur moyenne des coléoptiles	80
17	Effet du plomb sur le nombre moyen de radicules	80
18	Effets du plomb sur le contenu en pigments photorécepteurs des jeunes plantules issues de la germination de la variété Gta dur	82
19	Effets du plomb sur le contenu en pigments photorécepteurs des jeunes plantules issues de la germination de la variété Vitron	82
20	Effets du plomb sur le contenu en sucres solubles, protéines et proline des jeunes plantules issues de la germination des graines de la variété Gta dur.	83
21	Effets du plomb sur le contenu en sucres solubles, protéines et proline des jeunes plantules issues de la germination des graines de la variété Vitron.	83
22	Effets du plomb sur l'activité enzymatique de l' $\alpha$ amylase	85
23	Effets du plomb sur l'activité enzymatique de la $\beta$ amylase	86
24	Effets du plomb sur l'activité amylasique globale ( $\alpha+\beta$ )	86
25	Effets du plomb sur l'activité lipasique des graines de blé dur mises en germination.	87
26	Effets du plomb sur l'activité de la peroxydase (POD)	88
27	Effets du plomb sur l'activité de la catalase (CAT)	89
28	Effets du plomb sur l'activité de gaiacol peroxydase (GPX)	89
29	Effets du plomb sur l'activité de l'enzyme ascorbate peroxydase (APX)	91
30	Effets du plomb sur l'activité de l'enzyme glutathion sulfotransférase (GST).	92
31	Effets du plomb sur la teneur en glutathion dans les jeunes plantules issues de la germination	93
32	Effets du plomb sur la teneur en chlorophylle (a) dans les plantules de l'essai de croissance.	100

33	Effets du plomb sur la teneur en chlorophylle (b) dans les plantules de l'essai de croissance.	101
34	Effets du plomb sur la teneur en chlorophylle totale (a+b) dans les plantules de l'essai de croissance.	101
35	Effets du plomb sur la teneur en caroténoïdes dans les feuilles de l'essai de croissance.	102
36	Effets du plomb sur la teneur en protéines dans les jeunes plantules issues de la germination des graines de blé	103
37	Effets du plomb sur la teneur en glutathion dans les jeunes plantules issues de la germination des graines de blé	104
38	Effets du plomb sur l'activité de la peroxydase (POX) dans les jeunes plantules de l'essai de croissance.	105
39	Effets du plomb sur l'activité de la catalase (CAT) dans les jeunes plantules de l'essai de croissance.	106
40	Effets du plomb sur l'activité de l'enzyme gaïacol peroxydase (GPX) dans les jeunes plantules de l'essai de croissance.	107
41	Effets du plomb sur l'activité de l'enzyme ascorbate peroxydase (APX) dans les jeunes de l'essai de croissance.	108
42	Effets du plomb sur l'activité de l'enzyme glutathion sulfotransférase (GST) dans les jeunes plantules de l'essai de croissance.	109

## INTRODUCTION GENERALE

La pollution est la conséquence du développement industriel mondial, ses effets menacent la santé de l'homme, de l'animal et la productivité des récoltes (Prud'homme, 1980). Etant donné la diversité de différentes pollutions et leurs formes actives, les chercheurs dans le monde entier ont développé des thèmes à caractères scientifiques sur ce fléau mondial pour minimiser le risque de contamination qui se transmet par le biais de la chaîne alimentaire. En effet, un des problèmes majeurs de l'environnement est la contamination de l'atmosphère, des eaux et des sols par de nombreux éléments et composés toxiques, tels que : les hydrocarbures, les poussières, les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone, les métaux lourds. Si certains éléments métalliques (ETM) présents à l'état de traces sont essentiels pour les organismes, d'autres éléments ne sont pas indispensables et ne peuvent produire que des effets nocifs comme le plomb (Pb), le mercure (Hg), le cadmium (Cd), etc. Leur présence dans l'environnement est fortement aggravée par les activités anthropiques.

Parmi les métaux lourds les plus répandus dans l'environnement, le plomb, est un polluant potentiel qui s'accumule facilement dans le sol et les sédiments. La contamination des sols par cet élément toxique dont la densité excède  $5 \text{ g.cm}^{-3}$  (Kozłowski *et al.*, 2003) est un phénomène naturel qui s'est généralisé suite à des pratiques agricoles et industrielles. Il exerce une action néfaste sur les communautés végétales et animales, en s'insérant dans les chaînes trophiques (Adriano, 2001 ; Alkorta *et al.*, 2004) et provoque de sérieux désordres. Bien qu'il ne soit pas un élément essentiel pour la vie des plantes, il est facilement absorbé et accumulé dans différentes parties des végétaux. A l'échelle macroscopique, le plomb entraîne des effets défavorables sur les plantes, en cas d'excès, il peut exercer une toxicité (Prasad, 1999) affectant plusieurs étapes du développement allant de la germination à la croissance. Par ailleurs, sa translocation dans les organes des plantes induit aussi la production d'espèces réactives à l'oxygène (ROS) qui perturbent le statut redox des cellules et occasionne ainsi, un stress oxydatif ((Seregin et Ivanov, 2001 ; Sharma et Dubey, 2005). Cette caractéristique est connue pour être l'une des causes principale de la toxicité des métaux lourds. Les concentrations en Pb toxiques pour les végétaux varient considérablement selon les études. Elles dépendent essentiellement des interactions du Pb avec les espèces végétales considérées, de l'âge des plantes de la durée d'exposition, mais également du mode de culture et des facteurs environnementaux.

Par ailleurs, le blé est la deuxième céréale cultivée dans le monde après le riz, grâce à sa richesse en principes nutritifs. Les teneurs en apports énergétiques (amidon) et protéines (gluten, gluténines, gliadines) importantes font que cette céréale, représente à elle seule 17% des échanges agricoles internationaux. En plus, en raison de sa souplesse d'utilisation dans les rations alimentaires sous différentes formes, elle a été utilisée comme « arme alimentaire », pour faire chanter certains pays et les soumettre à leur diktat. La première nation qui a été ciblée et a fait les frais de sa politique est l'ex URSS quand elle a envahi l'Afghanistan en 1979, les USA, alors premier exportateur de cette denrée vers ce pays, a stoppé nettement la livraison.

L'Algérie pays en voie de développement, se trouve confronter à de nombreux problèmes agrotechniques (facteurs climatiques, édaphiques, cherté des intrants) pour augmenter la production et améliorer la productivité céréalière afin d'aboutir à l'autosuffisance et la sécurité alimentaire qui ne sont plus garantie. La situation actuelle de la céréaliculture est dramatique. Les surfaces réservées à la culture du blé sont marginales et la production et les rendements sont faibles. Pour faire face à la demande croissante de la population, l'Algérie importe chaque année pour 4 à 6 milliards de dollars US de céréales. Pour freiner ces importations massives et cette saignée en devises, des mesures incitatives ont été prises par la tutelle pour favoriser la culture des céréales sur des grandes superficies en valorisant le prix d'achat du quintal récolté qui est passé de 1400 DA à 4500DA. Malheureusement, suite à cette politique un effet pervers est apparu, les agriculteurs se sont mis à cultiver des céréales le long des axes autoroutiers, voire même dans les zones qui ne leurs sont pas prédestinées comme les plaines du littoral, les zones urbaines et rurales ou de nombreuses installations industrielles sont présentes générant ainsi un problème de pollution de l'atmosphère et des sols. Les effluents émis par les industries et la circulation automobile vont provoquer des désordres physiologiques, une chute du rendement et une dépréciation de la qualité de la denrée récoltée.

C'est dans ce contexte que se situe le présent travail dont l'objectif majeur est d'analyser le comportement de deux variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) cv. Gta et Vitron, vis-à-vis des traitements par le plomb. Cette graminée a été retenue dans cette étude en raison d'une part de son importance économique en Algérie de par sa culture extensive et d'autre part, comme modèle biologique facile à étudier grâce à un cycle végétatif étalé et des composantes biologiques de croissance et de rendement distinctes.

Durant ce travail de thèse nous avons choisi d'étudier les effets du plomb sur des périodes courtes d'exposition en considérant en particulier :

- l'effet sur les paramètres germinatifs,
- l'évolution des marqueurs de stress (pigments, protéines, proline),
- l'activité des enzymes antioxydantes qui sont aussi des marqueurs indirects du stress oxydatif notamment, la peroxydase (POD), la catalase (CAT), le glutathion peroxydase (GPX), l'ascorbate peroxydase (APX), le glutathion sulfotransférase (GST) et la réponse des plantes à cette exposition en concentration en glutathion, protéines et caroténoïdes, molécules intéressantes dans la détoxification du métal considéré.
- dans l'essai de croissance, en plus des paramètres étudiés précités, on s'est intéressé aussi à des variables agronomiques telles que : la surface foliaire (SF), le poids spécifique des feuilles (PSF), la teneur relative en eau des tissus du mésophylle foliaire (TRE).

Le travail de cette thèse est structuré en quatre parties :

La première partie : au début de ce travail figure le chapitre I, réservé à la présentation de l'espèce étudiée, du point de vue caractéristiques biologiques, origine, taxonomie botanique et valeur alimentaire et économique dans le monde à travers les échanges internationaux.

La seconde partie : le chapitre II est consacré au plomb comme élément trace métallique, ses propriétés physico-chimiques, ses sources de pollutions, ses principales utilisations et ses impacts sur l'environnement.

La troisième partie : le chapitre III traite la partie expérimentale, le matériel et méthodes utilisés dans cette thèse notamment, le dispositif expérimental, le plan de culture, les traitements, les techniques analytiques de dosages.

Dans la quatrième partie : le chapitre IV, les résultats de notre étude sont présentés en détail à travers 2 volets organisés :

le premier axe développe les résultats de la germination et

le deuxième axe, lui s'intéresse à l'aspect appliqué à la thématique, observations et résultats sur sol et leur discussion.

Enfin, ce travail se termine par une conclusion générale et des suggestions en perspectives.

## CHAPITRE I : CARACTERISTION DU BLÉ

### INTRODUCTION

Le blé est l'une des principales ressources alimentaires de l'humanité. La production mondiale de blé en 2012, est de 690 millions de tonnes, bien qu'en légère baisse (- 1,4 %) par rapport à celle - record - de 2011 (700 Mt), elle resterait notablement supérieure à la moyenne des cinq dernières années. En Algérie, la production céréalière réalisée en 2012 s'est établie à 51,2 millions de quintaux (campagne 2011-2012) contre 42 et 45 millions de quintaux en (2010/11) et 45 millions en (2009/10). La production de 2009 a été un record avec 61,2 millions de quintaux. Contre toute attente, l'Algérie sera présente encore cette année sur les marchés internationaux des céréales, pour s'y approvisionner en blé, pour satisfaire la consommation locale. En effet, le blé constitue la base de l'alimentation de la de la population algérienne. La production nationale de céréales et la productivité est assez faible puisqu'elle ne tourne qu'autour de 10 à 15Qx/ha et ceci se répercute sur l'écart qui se creuse entre l'offre et la demande. Le déficit en blé est estimé à environ 8 millions de tonnes par an, d'où l'appel à des importations massives payables en devises. A titre illustratif, le prix de la tonne du blé tendre est passé de 250 dollars, il y a une année, à 286 dollars actuellement, alors que celui du blé dur dépasse les 400 dollars la tonne, actuellement, contre 350 dollars à la même période de 2011. Les prix des aliments à l'échelle internationale ont augmenté de 1% en février 2013, c'est la deuxième hausse en deux mois (FAO, 2013).

Le blé constitue la base de l'alimentation de la population algérienne. Les prévisions d'importations pour l'année 2013 s'élèvent à 3 milliards de dollars US ou plus. Ceci, démontre bien notre dépendance vis-à-vis de l'étranger et notre incapacité à s'auto suffire. En effet, l'Algérie, non seulement peine à assurer sa sécurité alimentaire mais souffre d'un déficit de l'ordre de 75% quant à la disponibilité des produits de large consommation notamment les céréales, mais ce qui inquiète surtout, c'est cette hausse effrénée des importations qui ne cesse de progresser avec plus de 50% et qui s'ajoutera à la facture alimentaire globale pour atteindre 12 milliards de dollars US en 2013 assimilant l'Algérien à « un simple tube digestif », un consommateur hors pair et ce, malgré les différents programmes nationaux de développement de l'agriculture mis en œuvre depuis une dizaine d'années. Parmi les pays exportateurs de blé, la France, le Canada et les USA demeurent les principaux fournisseurs du pays en blé.

## 1. Historique et origine du blé

L'histoire des blés est étroitement liée à l'histoire de l'humanité. Depuis la plus haute antiquité, le blé est connu et sa culture remonte au Néolithique.

Il y a plus de 3 millions d'années, l'homme préhistorique était nomade, pratiquait la chasse et la cueillette des fruits pour assurer sa nourriture. Le nomadisme a progressivement laissé la place à la sédentarité qui a permis la domestication d'animaux pour l'élevage et la culture des céréales à partir d'espèces végétales sélectionnées pour leurs caractéristiques agronomiques (facilité d'implantation) ou alimentaires (comestibilité, valeur alimentaire).

Les premières utilisations étaient alors des bouillies de céréales moulues ou des galettes rudimentaires sans levain comparables à celles que fabriquent les populations arabes, aujourd'hui au Maghreb et Moyen Orient. C'est 3000 ans avant JC que les premiers procédés de panification ont été élaborés par les égyptiens qui préparaient déjà les premières galettes à base de blé. Sachant alors, produire sa propre nourriture, l'homme a en même temps acquiert son autosuffisance alimentaire. Par la suite, apparaissent les premiers échanges commerciaux. Les techniques de panification s'améliorent grâce aux arabes, grecs, et enfin romains qui en répandent l'usage à travers l'Europe. C'est ainsi que sous des formes culinaires très variées (pain, biscuits, couscous, pâtes, ...), le blé deviendra l'aliment essentiel de la civilisation occidentale.

A la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle, le blé est exporté en Amérique du Nord par les Anglais et est rapidement adopté par les civilisations présentes comme matière première de base pour la fabrication du pain, en raison de sa composition en gluten supérieure aux autres céréales. A travers les siècles et les générations, le grain de blé a conservé toutes ses valeurs et reste un élément essentiel à notre alimentation. Aujourd'hui le blé fait partie de notre quotidien, présent dans de nombreuses compositions de nos ressources alimentaires.

L'origine exacte du blé est mal connue et controversée. De nombreux faits témoignent que l'origine du blé se situe dans la partie Nord Est du croissant fertile (Egypte, Palestine, Liban), des graines de blé ont été trouvées stockées dans des jarres en argiles datant de 5000 ans, du temps des Pharaons (Feldman 1976, Sears, 1976 In Doubaï, 2001). Alors que, d'autres auteurs avancent que c'est l'Asie mineure son lieu d'origine ou l'on rencontre encore à l'état sauvage ses ancêtres primitifs. Aujourd'hui, la culture du blé est répandue

dans toute les régions du monde où les conditions agro-climatiques sont favorables et notamment dans tous les pays du bassin Méditerranéen.

## 2. Importance alimentaire

Les céréales notamment les blés possèdent une grande valeur alimentaire grâce à leur richesse en principes nutritifs. En effet, elles constituent la plus grande ressource en amidon (70%) et protéines (10%) (Tableau.1). Pendant la maturité de la graine les substances de réserves sont accumulées soit dans le cotylédon, soit dans le péricarpe. Elles comprennent essentiellement: - de l'eau d'environ 14 %, -70 – 80 % de glucides (de l'amidon ; du gluten associé à l'amidon ; des hémicelluloses dans les parois cellulaires et des sucres solubles), - 9 – 15 % de protéines, notamment des protéines de réserves, -1.5 – 2 % de lipides, dont 60 % sont des lipides libres apolaires et 40 % sont des lipides polaires. - des enzymes, telles que les amylases, les protéases, les lipases et les lipoxygénases (Compion et Compion, 1995 ; Samson et Morel, 1995 ; Cherdouh, 1999).

**Tableau.1 : Composition chimique du grain de blé d'après Feillet, (2000)**

Culture	Eau	protéines	Lipides	Glucides		
				Mono et disaccharide	Amidon	Cellulose
<b>Blé dur</b>	14	12.5	1.9	2.1	64.9	2.3

Les blés renferment aussi des éléments minéraux et des vitamines (Goden 1985 ; Bonjean et Picard, 1990) (Tableau.2).

**Tableau.2 : Teneur moyenne en éléments minéraux et vitamine en mg pour 100g de blé (Goden, 1985 ; Bonjean et Picard, 1990)**

Elément	Ca <sup>++</sup>	Fe <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Mn <sup>++</sup>	P <sub>2</sub>	K <sup>+</sup>	Zn <sup>++</sup>	Riboflavine	Thiamine
Teneur en (mg)	40	4	140	3	300	450	5.5	0.2	0.4

### 3. Importance économique

Les blés constituent une ressource alimentaire non négligeable pour la population humaine. En effet, leur richesse en principes nutritifs (protéines sucres, éléments minéraux et vitamines) en fait d'eux une principale ressource. Ils fournissent aussi une ressource importante pour l'alimentation animale des élevages et possèdent également de nombreuses transformations industrielles pour la fabrication d'aliments à partir de leurs sous-produits.

Les blés font partie des trois (03) grandes céréales cultivées dans le monde. Avec le maïs et le riz c'est aussi, la deuxième graminée consommée après le riz selon les habitudes alimentaires des peuples. La production mondiale de blé en 2008 a été de 686.8 millions de tonnes (CIC, 2008) et de 700 millions de tonnes en 2011 (FAO, 2012), production record jamais enregistrée.

Après avoir été cultivé pour les besoins restreints des tribus et peuples pour leur autosuffisance et autarcie durant des milliers d'années, la culture du blé a connu un grand essor avec l'avènement de l'ère industrielle du 19<sup>ème</sup> siècle. La mécanisation, l'utilisation des charrues mécaniques et la fertilisation ont permis aux agriculteurs d'augmenter leurs récoltes. Aussi, l'augmentation de la production végétale dans ce domaine a forcé et a poussé les producteurs à s'organiser en coopératives pour dégager les excédents, créant ainsi de grands domaines spécialisés avec des moyens rentabilisés et une bonne maîtrise de la conduite de la culture (époque de semis, période d'épandage d'engrais, traitement phytosanitaire, etc.). Au cours de ces deux (02) derniers siècles, le blé a acquis une véritable valeur symbolique de par son importance dans les échanges commerciaux dans l'économie mondiale.

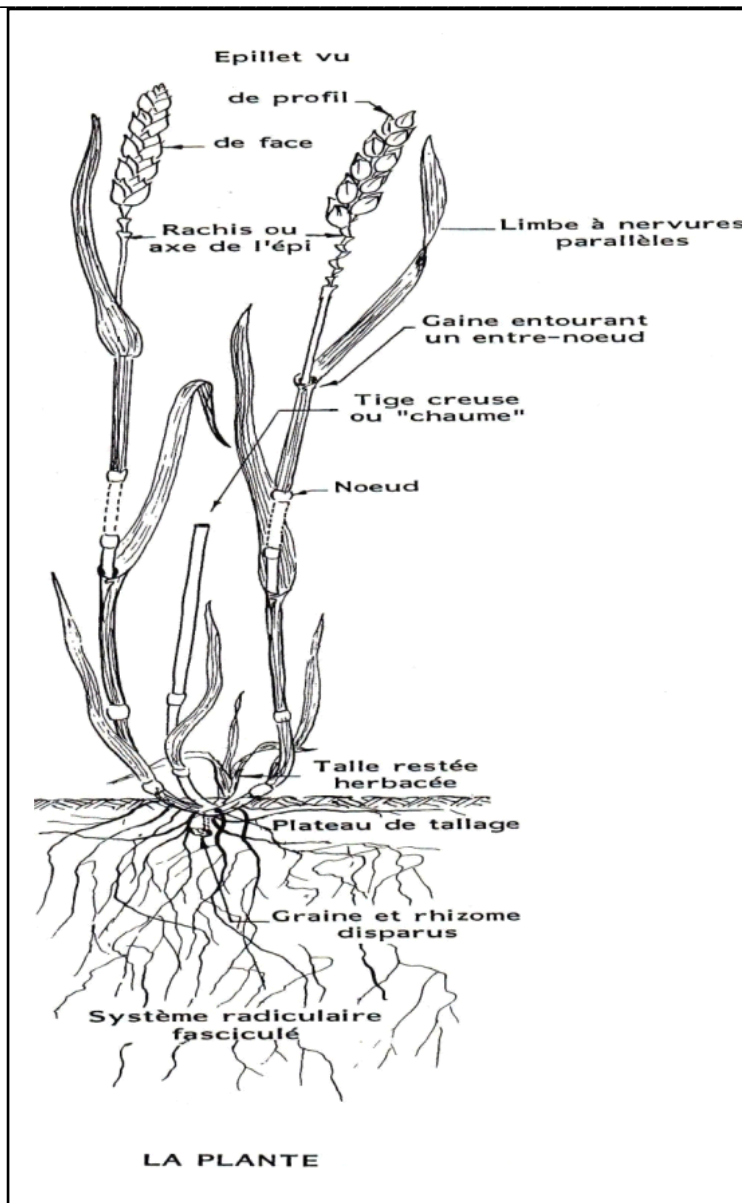
Dans les pays pauvres ou en voie de développement, la production de blé est déficitaire à cause des contraintes économiques et techniques, ce qui a pour conséquence une dépendance accrue de ces pays aux pays exportateurs, causant ainsi, une diminution du niveau des stocks mondiaux et une augmentation considérable des prix sur le marché international.

## 4. Botanique du blé

### 4.1. Caractères botaniques du blé

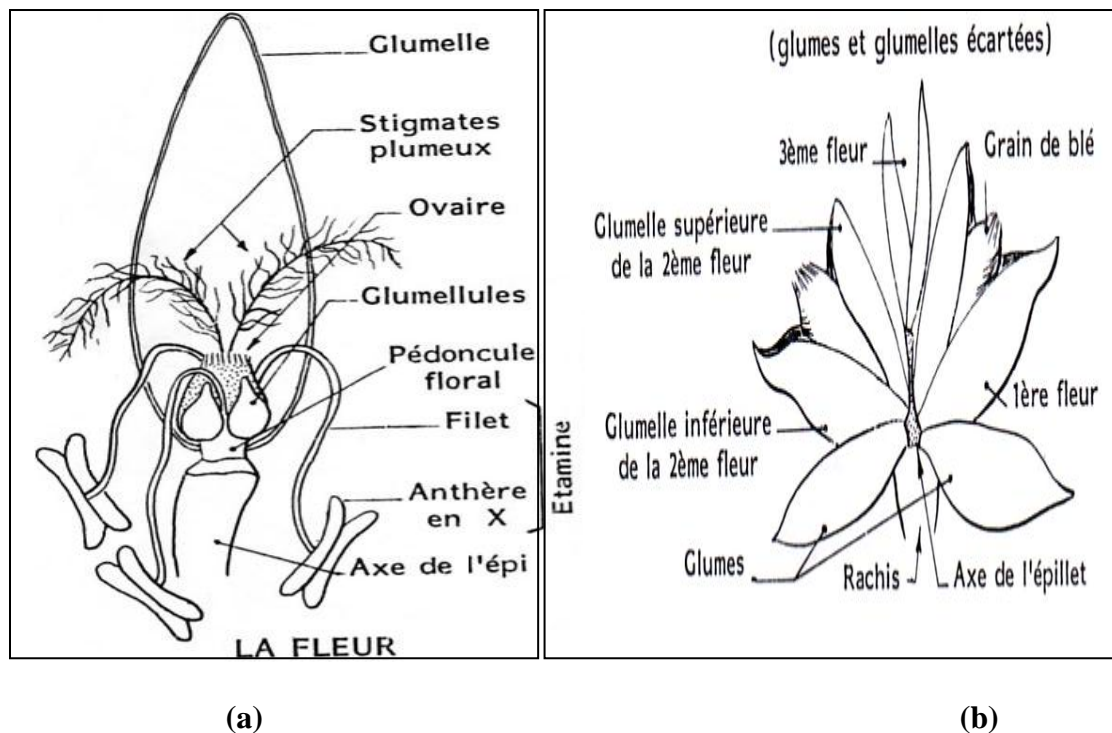
Les principaux caractères du blé se résument ainsi :

- le blé est une graminée à cycle annuel, caractérisée par un appareil végétatif herbacé et élevé pouvant atteindre jusqu'à 1.5m de hauteur selon les espèces,
- la tige appelée aussi chaume est caractéristique de la famille à laquelle elle appartient. Elle est creuse, cylindrique, ses entre-nœuds s'allongent durant la phase de montaison,
- le système racinaire est du type fasciculé. A la germination, des petites racines séminales apparaissent et fonctionnent jusqu'au tallage. Ensuite, elles seront remplacées par un autre système de racines dit coronaires ou adventices, plus denses et longues pour absorber l'eau et les nutriments du sol, assurant ainsi, la croissance et le développement de la plante.
- les feuilles sont oblongues, engainantes à nervures parallèles issues chacune d'un nœud et sont terminées en pointe. Elles sont formées de deux parties : la gaine qui entoure la tige et le limbe, dont la base se termine par deux stipules larges et poilues et une ligule courte, caractéristique des blés (Figure.1),



**Figure.1: Dessin d'un plant de blé**

- la fleur autogame est très petite et sans éclat (Figure. 2a)
- l'inflorescence est un épi d'épillets. Il est issu du bourgeon terminal du plateau de tallage .Il comporte une tige pleine ou rachis et porte 15 à 25 épillets constitués chacun de 3 à 4 fleurs (Figure.2b).



**Figure.2: Morphologie de la fleur (a) et d'un épillet de blé (b).**

-le fruit est sec et indéhiscent est appelé aussi graine ou caryopse il est nu, de section subtriangulaire et de couleur blanc roux. Il pèse 45 à 60 mg, et possède un albumen vitreux chez le blé dur. Par contre, chez le blé tendre, il est de forme ovoïde possède un poids variant de 35 à 50 mg et un albumen plus ou moins farineux (Soltner., 2005).

Une coupe longitudinale (CL) du grain montre bien trois compartiments :

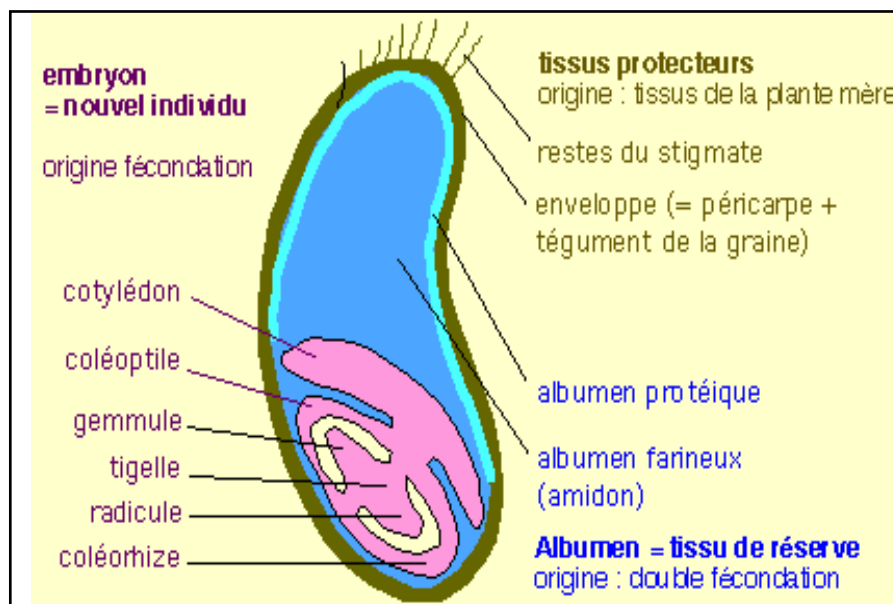
\* les enveloppes comprennent le péricarpe du fruit et les téguments de la graine représentent 14 à 15% du poids du grain. Le péricarpe ou tégument du fruit est constitué de 3 assises cellulaires:

- l'épicarpe, protégé par la cuticule et les poils,
- le mésocarpe, formé de cellules transversales,
- l'endocarpe, constitué par des cellules tubulaires.

Il est particulièrement riche en cellulose, hémicelluloses et pentosanes ainsi qu'en éléments minéraux (Godon et William, 1991).

\* le germe représente 1.5% du poids du grain, comprend le cotylédon de la plantule (embryon),

\* l'albumen ou l'amande représente 83 à 85% du poids du grain est composé de 70% d'amidon (albumen amylicé) et 7% de gluten (assise protéique). Principalement donc amylicé et vitreux chez le blé dur, il possède à sa périphérie une couche à aleurone riche en protéines, lipides pentosanes, hémicelluloses et minéraux (Figure.3).



**Figure. 3: Coupe longitudinale d'un grain de blé montrant les différents constituants**

## 4.2. Systématique

La classification des Graminées est complexe et a beaucoup varié. Fondée tout d'abord sur la morphologie florale, elle a utilisé progressivement de nombreux autres caractères: histologie des épidermes, biochimie et génétique. On distingue 6 à 8 sous familles et 30 tribus d'importance très inégale (Ozenda, 2000).

Les Graminées vivrières (céréales) sont des monocotylédones de l'ordre des Graminales et /ou Poales. Elles appartiennent à la famille des Graminae et/ ou Poaceae. Cette sous famille ou «famille» des Poaceae, la plus nombreuse (200 genres) contient la presque totalité des Graminées de la flore européenne et méditerranéenne (500 espèces).

Le mot blé a longtemps désigné toute la famille des céréales qui sont au nombre de 13 dont le mil, le sorgho et le seigle font partie. Par contre, les deux espèces qui dominent la production mondiale sont le blé dur et le blé tendre.

Une classification des espèces étudiées est donnée dans le tableau.3.

**Tableau.3 : Position systématique de l'espèce étudiée**

Règne	Plantae
Embranchement	Spermaphytes
Sous Embranchement	Angiospermes
Classe	Monocotylédones
Sous Ordre	Commeliniflorales
Ordre	Graminales et/ou Poales
Famille	Graminae et /ou Poaceae
Genre et Espèce	<i>Triticum durum</i> Desf.

- le blé dur : *Triticum turgidum ssp durum* qui est surtout cultivé dans les zones chaudes du bassin méditerranéen. Ce blé est riche en gluten et sert à fabriquer les pâtes alimentaires et les semoules.

- le blé tendre: *Triticum aestivum*, beaucoup plus cultivé aux U.S.A, Canada, France, Italie et Ukraine pour faire de la farine utilisée pour le pain. Dans l'Algérie coloniale, Ducellier (1930), cite la présence de neuf (09) variétés ou populations. Ce sont des blés tendres des Oasis (*Triticum vulgare* Host var *oasicolum* L.D), qui se caractérisent des autres blés par leurs épis denses, courts ou allongés, pourvus de barbules courtes, droites ou en crochet, de barbes épaisses courtes en général. (Tableau.4).

Signalons par ailleurs, que d'autres espèces ou sous espèces existent comme :

- l'épeautre, sous espèce du blé tendre : *Triticum aestivum ssp spelta*, plante à grain vêtu et très apprécié pour l'agriculture biologique. Cette espèce était cultivée autrefois en Afrique du Nord. Ducellier (1930), cite que cette espèce était très rare et que parmi le blé épeautre du Sahara, il y'avait 9 variétés (Tableau.4)

- l'engrain ou petit- épeautre : *Triticum monococcum*, espèce à grain vêtu également, très cultivée par le passé, qui est en partie à l'origine des blés cultivés mais caractérisé par de faibles rendements.

Ce premier type de classification basé sur les caractéristiques morfo-anatomiques a été instauré par Linné en 1723 pour les études botaniques pour faciliter la constitution

d'herbiers par la reconnaissance, l'inventaire et la classification d'espèces possédant des caractères communs.

**Tableau.4 : Liste des blés des Oasis et du Sahara mentionnés par Ducellier, (1930)**

N°	Variété ou population	Observation
<b>Blé tendre</b>		
01	Blé Saroudi	Dans le Touat, Gourara
02	Blé Chatar	Dans le Touat de Gourara
03	Blé Chedjera	Dans la vallée de la Sahoura
04	Blé El Koufi	Très répandu
05	Blé Fereh ou Hamra	Sans barbes cultivé en mélange
06	Blé Hamra barbu	Dans le Touat de Gourara
07	Blé Mansouri	Estimé dans les Oasis et le Hoggar
08	Blé Moumenia	Estimé dans le Touat
09	Blé Sekoundra ou Tarerfast	Dans le Touat et Gourara
<b>Blé epeautre</b>		
01	Abdessalem	Dans le Touat et Gourara
02	Ali Ben Makhlof	Dans la vallée de la Saoura et oasis de Touat
03	Blé d'In Salah	Dans les Oasis de Tidekelt et Touat
04	Bou-Chouka	Cultivé dans le Nord du Sahara
05	Djeghloul rouge barbu	Estimé au Gourara
06	El Khamra	Dans le Touat et Hoggar
07	Masraf	Dans les Oasis de Tidekelt et Touat
08	Sebbaaga	Dans le Gourara et Touat
09	Sidi-Mansour	Dans le Gourara

En revanche, du point de vue génétique, le blé dur est un hybride résultant d'un croisement naturel, spontané et aléatoire de l'engrain (*Triticum monococcum*) forme sauvage *sensu stricto* et une herbe apparentée appelée *Aegilops speltoides*, qu'on rencontre dans les mêmes aires géographiques.

L'espèce tétraploïde (*Triticum turgidum*) résulte d'un croisement naturel entre le *T. monococcum* et une herbe nommée *Aegilops speltoides* (Graminée) ; la première espèce a

---

fourni le génome A, et la seconde, le génome B. La domestication de ce blé tétraploïde (AABB) a évolué vers *T. turgidum ssp dicoccum* puis vers *T. durum* (blé dur cultivé). En 1936 Vavilov, répertoria les blés tétraploïdes selon leur origine géographique en deux groupes :

-la sous espèce VAV méditerranéen qui se trouve autour du bassin méditerranéen  
-la sous espèce européen VAV qui se situe dans les Balkans et les ex pays de l'union soviétique. Selon leur contenu chromosomique et l'état de ploïdie, le genre *Triticum* se répartie en trois groupes distincts :

- le groupe diploïde ( $2n= 14$  chromosomes)
- le groupe tétraploïde ( $2n= 28$  chromosomes)
- le groupe haploïde ( $2n= 42$  chromosomes).

Sakamura (1918) cité par Cauderon (1979), fut le premier à déterminer le nombre exact des chromosomes de diverses espèces de *Triticum* et leurs niveaux de ploïdie différents :

- Triticum aestivum*: 42 chromosomes, hexaploïde ; Génome AABBCC
- Triticum turgidum* : 28 chromosomes, tétraploïde ( $2n=4x=28$ ) Génome AABB ;
- Triticum monococcum* : 14 chromosomes, diploïde (Cauderon, 1979 ; Lieu *et al.*, 1996).

**Tableau.5: Nomenclature des blés cultivés actuellement et leurs espèces apparentées, selon Van Slageren, (1994) in Abdelguerfi, (2000)**

N°	Espèces et sous-espèces	Noms communs
01	<i>Triticum monocuccum</i> L <i>ssp.aegilopoides</i> (Link) Thell. <i>ssp.monocuccum</i>	Engrain sauvage Engrain cultivé ou Petit Epeautre
02	<i>Triticum uratu</i> Tunex.Gand	Pas de nom commun (forme sauvage)
03	<i>Triticum timopheevii</i> (Zhuk) Zhuk <i>ssp.armeniicum</i> (Jakubz) van Slageren <i>ssp.Timpphee</i>	<i>T.timopheevii</i> sauvage <i>T.timopheevii</i> cultivé
04	<i>Triticum turgidum</i> L (Thell) <i>ssp.dicococoides</i> (Korn ex aschetGraedn) Thell <i>ssp.dicocum</i> (Shramk)Thell <i>ssp.paleocolchicum</i> (Men)A Love e D Love <i>ssp.parvicocum</i> Kislev <i>ssp. durum</i> (Desf.) Husn <i>ssp.turgidum</i> <i>ssp.polonicum</i> (L) Thell <i>ssp.turgidum</i> (Jakubz) A Love e D Love <i>ssp.cartihlium</i> (Nevaski) A Love e D Love	Amidonnier sauvage Amidonnier cultivé Blé de Géorgie Pas de nom commun Blé dur Blé poulard Blé de Pologne Blé Khorasan Blé de Perse
05	<i>Triticum zhukovskyi</i> Men e Ex	Pas de nom commun
06	<i>Triticum aestivum</i> L <i>ssp.spelta</i> (T) Thell <i>ssp.macha</i> (Dek e Men) MK <i>ssp. aestivum</i> <i>ssp compactum</i> (Host) MK <i>ssp..sphaerococum</i> (Percival)M K	Grand Epeautre Pas de nom commun Blé tendre ou Froment Blé compact ou blé hérisson Blé sphérique ou indien

## 5. Phénologie du blé

La phénologie est une science qui divise la vie végétale d'une culture en étapes de développement ou phases phénologiques (Tableau.6, Figure.5). Elle est exprimée en phases accomplies par rapport au temps ou encore par rapport à des indices bioclimatiques tels que l'indice somme des températures ( $\sum\Theta$ ) pour se rendre compte de l'influence du climat. Le relevé des phases phénologiques d'une manière schématique permet de mieux raisonner les périodes importantes d'intervention en culture pour leur entretien comme, la fertilisation, l'épandage d'engrais ou l'amendement organique, le traitement phytosanitaire pour lutter contre les ennemis des cultures et les déprédateurs etc.

Tableau. 6 : Echelle phénologique d'après Zadocks *et al.*, (1974)

<p><b>0 Germination</b>  00 : graines dures  01 : début de l'imbibition  03 : imbibition complète  05 : émergence de la racicule  07 : émergence des coléoptiles  09 : sortie de la 1<sup>ère</sup> feuille</p> <p><b>Montaison</b>  30 : sortie d'un pseudo feuille (céréale d'hiver)  31 : 1<sup>ère</sup> feuille  32 : 2<sup>ème</sup> feuille  33 : 3<sup>ème</sup> feuille  34 : 4<sup>ème</sup> feuille  35 : 5<sup>ème</sup> feuille  36 : 6<sup>ème</sup> feuille  37 : sortie de la feuille étendard  38 : sortie de la ligule de la feuille étendard</p>	<p><b>Développement de la plante</b>  10 : 1<sup>ère</sup> feuille traverse le coléoptile  11 : 1<sup>ère</sup> feuille développée  12 : 2<sup>ème</sup> feuille développée  13 : 3<sup>ème</sup> feuille développée  14 : 4<sup>ème</sup> feuille développée  15 : 5<sup>ème</sup> feuille développée  16 : 6<sup>ème</sup> feuille développée  17 : 7<sup>ème</sup> feuille développée  18 : 8<sup>ème</sup> feuille développée  19 : 9<sup>ème</sup> feuille développée</p> <p><b>Gonflement</b>  41 : développement de la gaine de la F étendard  43 : début gonflement des talles  45 : gonflement des talles  47 : déchirement de la gaine de la F  49 : apparition des 1<sup>ères</sup> barbes</p>	<p><b>Tallage</b>  20 : tige principale seule  21 : tige principale et 1 talle  22 : tige principale et 2 talles  23 : tige principale et 3 talles  24 : tige principale et 4 talles  25 : tige principale et 5 talles  26 : tige principale et 6 talles  27 : tige principale et 7 talles  28 : tige principale et 8 talles  29 : tige principale et plus de 9 talles</p> <p><b>Epiaison</b>  51 : sortie des 1<sup>ers</sup> épillets  53 : sortie des ¼ de l'épi  55 : sortie du ½ de l'épi  57 : sortie du ¾ de l'épi  59 : sortie de tout l'épi</p>
<p><b>Floraison</b>  61 : début floraison  65 : moitié de la floraison  69 : fin de la floraison</p>	<p><b>Développement laiteux</b>  71 : maturité physiologique  73 : début du développement laiteux  75 : semi du Développement laiteux  77 : fin du Développement laiteux  augmentation de la solidification du liquide endospermique visible quand on écrase la graine entre les doigts</p>	<p><b>08. Développement pâteux</b>  83 : début du développement pâteux  85 : pâte encore molle (ne garde pas l'empreinte du doigt)  87 : durcissement de la pâte (garde l'empreinte du doigt)  -perte de la chlorophylle à l'extrémité</p>
<p style="text-align: center;"><b>Maturation</b></p> <p>91 : durcissement des graines (difficile à diviser avec l'ongle)  92 : graines dures (ne sont pas rayées à l'ongle)  93 : graines se détachent de l'épi pendant la journée  94 : prématurée : paille sèche et se casse  95 : graine en dormance  96 : viabilité des graines à la germination  97 : fin de la dormance  98 : déclenchement de la dormance secondaire  99 : perte de la dormance secondaire</p>		

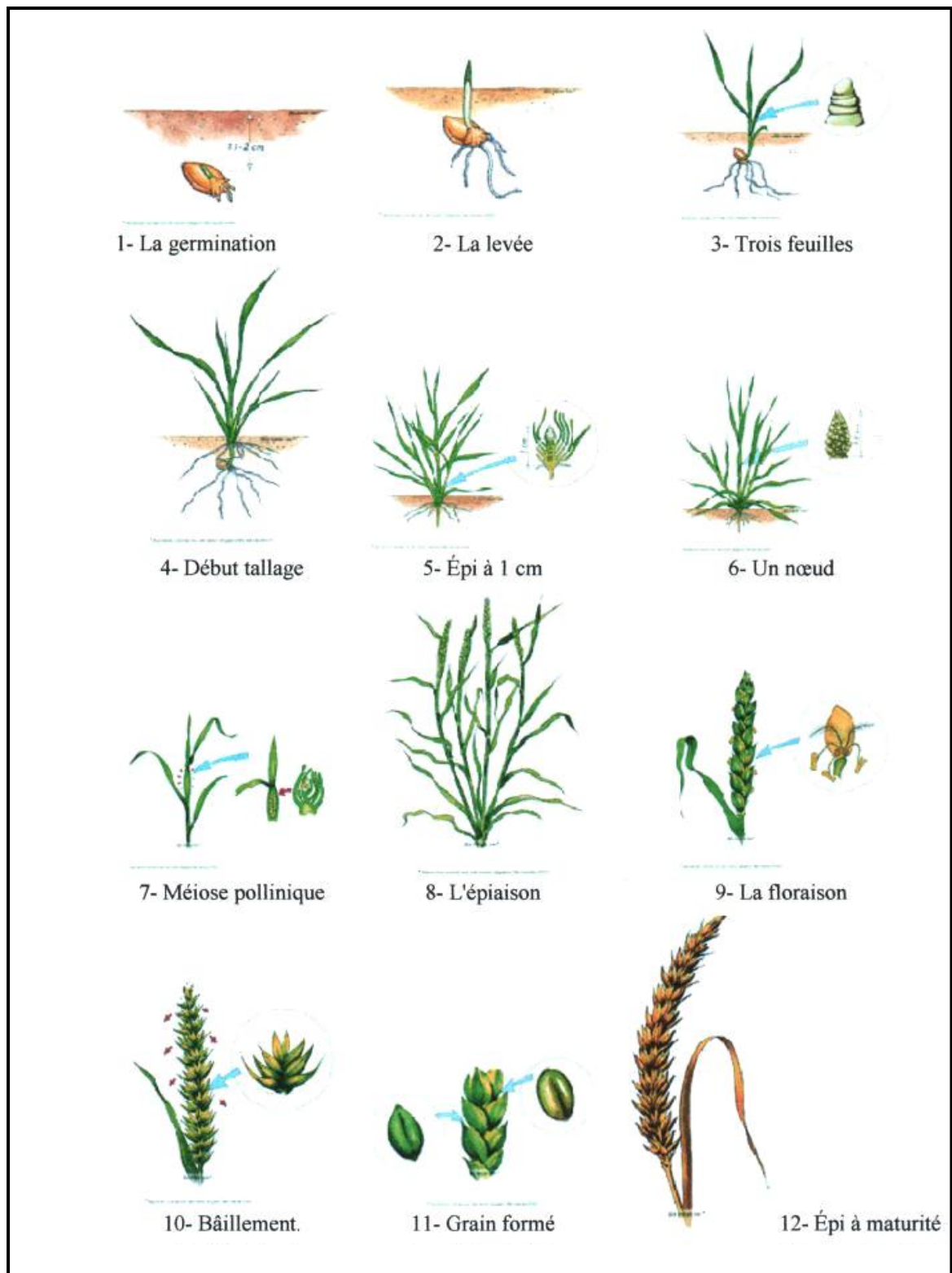


Figure.4 : Stades phénologiques d'une Graminée, le blé.

Le blé est une plante à cycle végétatif annuel. Dans ce cycle une série d'étapes séparées par des stades repères permettent de le scinder en deux grandes phases : la phase végétative et la phase reproductrice. Chaque phase est elle-même divisée en plusieurs stades.

### **5.1. Phase végétative**

La phase végétative commence à la germination et se termine à la formation de l'ébauche de l'épi, elle se fait en deux stades.

#### **5.1.1. Stade de germination levée**

La germination est l'entrée en vie active de la graine en contact d'un support humide. La dégradation des réserves est enclenchée par les enzymes pour donner l'énergie chimique potentielle (ATP) pour être transformée en énergie mécanique par l'embryon pour réaliser des divisions cellulaires et former des organes qui percent les téguments: le coléorhize et le coléoptile. Ce dernier joue un rôle protecteur et mécanique pour percer le sol.

On parle de levée lorsque 50% des jeunes plantules sont sorties de terre (Gate, 1995). Les folioles amorcent la photosynthèse, mais toujours au détriment des réserves du grain.

#### **5.1.2. Stade de tallage**

Le tallage est un phénomène qui contribue à la formation de nouvelles talles (tige secondaire) chez les graminées. Le début du tallage commence par l'apparition de l'extrémité de la première feuille de la talle primaire latérale. Par la suite, de nouvelles talles et racines vont se former à partir d'un renflement cellulaire ou tissulaire appelé plateau de tallage. On considère que ce stade est atteint lorsque 50% des plantules présentent au moins une talle secondaire (Gate, 1996). Le tallage est un facteur de rendement chez les blés. De nombreux facteurs influencent l'émission de nouvelles talles notamment, la densité de semis de la culture, la compétition des plantes adventices (mauvaises herbes), à nutrition azotée et enfin la variété. Il marque la fin de la période végétative et le début de la phase reproductrice chez les graminées.

### **5.2. Phase reproductrice**

La phase reproductrice est elle-même divisée en plusieurs phases:

#### **5.2.1. Phase de montaison-gonflement**

Cette phase commence à partir de la fin du tallage herbacé. Les talles commencent à s'allonger suite à l'élongation des entre-nœuds. La plante atteint progressivement sa hauteur

maximale. On observe alors un renflement formé par l'épi à l'apex de la tige au-dessus du dernier nœud, puis il y'a l'apparition des glumelles ensuite la formation des organes reproducteurs. La durée de cette phase est d'un mois en moyenne.

### **5.2.2. Phase d'épiaison-fécondation**

Au cours de ce stade s'achève la formation des organes floraux avec leur taille définitive. Les étamines à maturité vont sortir des glumelles et libérer le pollen qui va féconder l'ovaire, c'est la fécondation. Celle-ci est dépendante des conditions édapho-climatiques (fertilité du sol, azote, température). La durée de cette période est à peu près d'un mois.

### **5.2.3. Phase de grossissement du grain**

Cette période correspond au développement de l'ovaire après fécondation. C'est une phase très active du point de vue métabolique. La photosynthèse culmine pour atteindre un seuil maximum et la matière sèche synthétisée dans les feuilles va migrer et s'accumuler dans les organes de réserves qui sont les grains. A la fin de cette phase, 40 à 50% des réserves accumulées vont subir une maturation en deux étapes, du grain laiteux mou à pâteux dur. Cette phase peut durer jusqu'à 20 jours.

### **5.2.4. Maturation du grain**

C'est la dernière étape de la phase reproductrice avant la récolte. La maturation correspond à l'accumulation de l'amidon dans les grains. Par la suite, les grains vont subir une déshydratation naturelle pour perdre leur humidité:

- à 45% d'humidité, dans le grain, c'est le stade pâteux,
- à 20% d'humidité dans le grain, c'est le stade rayable à l'ongle,
- à 15 à 16% d'humidité dans le grain, c'est le stade cassant dur, il est alors mur pour la récolte (Soltner, 1981; Belaïd, 1996).

## **6. Exigences de la culture**

### **6.1. Exigences édaphiques**

Du point de vue sol, les blés préfèrent les terres meubles fines et profondes de texture équilibrée (Sablo-argilo-limoneux ou limono- argileux-calcaire ou encore argilo-siliceux) jouissant d'un bon pouvoir absorbant qui maintient une bonne fertilité et qui permet aux végétaux de puiser les nutriments nécessaires à leur croissance et développement à partir des

réserves chimiques du sol. En contrepartie, les sols tourbeux et argileux sont à craindre car ils sont difficiles à travailler, augmentent l'adhérence du matériel agricole et libèrent certaines teneurs d'éléments minéraux indésirables aux cultures tels que le sodium (Na), le fer (Fe) ou le magnésium (Mg).

### 7.1.1. Besoins en éléments fertilisants

La fertilisation des céréales s'exprime par rapport aux besoins de chaque culture qui ne sont d'autres que les éléments prélevés par la biomasse des récoltes plus les pertes subies au sol par phénomène de lessivage. La production des céréales (blés) exigent de bons sols riches en matières organiques et bien pourvus en éléments minéraux. A défaut de fertilité, il faut procéder à des opérations d'amendements ou de fertilisations pour corriger cette déficience.

**Tableau.7: Besoins des blés en éléments fertilisant N.P.K.**

Espèces	Eléments minéraux en Kg /Quintal		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
<i>Triticum aestivum</i>	20.8 à 3.2	1.3 à 1.6	3.4
<i>Triticum durum</i>	3.3 à 3.8	1.3 à 1.6	1.8 à 2.5

### 6.1.2. Rôle des éléments minéraux

#### 6.1.2.1. Rôle de l'azote

L'azote est l'élément essentiel de la production, son apport au moment opportun permet d'obtenir un bon rendement, et d'améliorer la teneur en matières sèches (MS). L'azote sous forme ammoniacal ou nitrique est absorbé par les racines pour entrer dans les voies de biosynthèse. La réduction du nitrate en ammonium est catalysée par deux enzymes: la nitrate et la nitrite réductase. La première est localisée dans le cytosol et la seconde dans les chloroplastes des feuilles. L'ammonium réduit est absorbé directement dans les racines est intégré aux molécules organiques. Les deux réactions sont catalysées par la glutamine synthétase et la glutamate synthétase. La proportion de nitrate et de l'ammonium absorbée varie selon les espèces et les conditions d'environnement. Quoi qu'il en soit une grande partie du nitrate absorbé devra être réduite en ammonium dans les racines ou dans les feuilles pour entrer dans les voies de synthèse d'acides aminés et protéines (Morot-Gaudry, 1997). L'application des nitrates sur un peuplement de Graminées stimule leur croissance. Une carence en azote entraîne un retard de la croissance et un nanisme des plantes, les feuilles sont petites, vertes et pâles en raison de la perturbation de la synthèse de la chlorophylle. Elles

jaunissent prématurément, les tiges sont grêles et se ramifient peu. Par contre, un excès d'azote se traduit par un fonctionnement excessif des méristèmes, une lignification fortement réduite, les tissus sont peu développés (Mazliak, 1998).

#### 6.1.2.2. Rôle du phosphore

Absorbé sous forme de  $P_2O_5$  par les plantes le phosphore fait partie des éléments plastiques puisqu'il entre dans la constitution moléculaire des acides nucléiques et des phospholipides. De plus c'est un cofacteur transporteur d'énergie (ATP, GTP, UTP, etc.). Les composés phosphorylés apparaissant dans le métabolisme général sont innombrables: trioses phosphates, hexoses phosphates, nucléosides. On le trouve également dans divers coenzymes : nucléotides comme le FMN (= Riboflavine Phosphorylée), le NADP (= NAD Phosphate), la Co carboxylase (= Thiamine Pyrophosphate). Il intervient aussi, d'une manière déterminante dans la constitution de certains éléments structuraux essentiels à la vie cellulaire, dans les échanges d'énergies et dans de nombreuses réactions métaboliques comme la photosynthèse (Heller *et al.*, 1998). Le phosphore est essentiel à la vigueur et la longévité des peuplements. En revanche, une carence en phosphore peut engendrer un nanisme des plantes et des malformations d'organes. La coloration des feuilles passe au vert foncé et même au vert bleuâtre (Mazliak, 1998). Un excès, par contre en (P) n'entraîne pas d'inconvénient majeur sinon économique.

#### 6.1.2.3. Rôle du potassium

L'ion Potassium ( $K^+$ ) se rencontre souvent associé à des anions inorganiques dans les solutions cellulaires. Son rôle principal est catalytique:

- il active certaines kinases (enzymes qui assurent les transferts de groupements phosphate à partir de l'ATP, ou vers l'ADP par exemple phosphofructokinase et le pyruvate kinase,
- il intervient indirectement dans la synthèse de protéines à partir d'acides aminés,
- il intervient également dans la synthèse des polysaccharides à partir des oses.

Au total, le potassium active plus de 60 enzymes (Heller *et al.*, 1998).

Le potassium participe aussi dans les mécanismes de perméabilité cellulaire. Son abondance et sa mobilité en font le cation le plus important pour la création de la pression osmotique et donc la turgescence vacuolaire. De même, c'est lui qui pour l'essentiel assure l'équilibre acido-basique des cellules.

Sur les végétaux cultivés, c'est un élément d'une extrême importance, indispensable à toutes les plantes. Il favorise la photosynthèse, diminue la transpiration et réduit le risque de flétrissement en cas de déficit hydrique. Il assure une alimentation équilibrée des plantes, améliore la qualité du rendement, augmente la production en grain, accroît la résistance aux maladies etc.

La fertilisation potassique ne peut pas s'appliquer en fumure de fond, car elle risque de brûler les semences (Reid, 2003). On peut toutefois l'appliquer en surface avant le semis ou au printemps sur la culture. Le principal facteur à prendre en considération avant d'appliquer un engrais potassique est le résultat de l'analyse du sol. Une déficience en (K) entraîne des déficiences dans la synthèse des protéines et de la photosynthèse. L'apparition de chloroses et nécroses aux bords et extrémités des feuilles sont visibles.

D'autres minéraux classés dans la catégorie des macroéléments viennent s'ajouter aux éléments majeurs déjà connus (azote N, le phosphore P, le potassium K), il s'agit du soufre (S), du magnésium (Mg), et du fer (Fe).

Le soufre est un constituant des aminoacides cystéine, cystine et méthionine. Par conséquent, il entre dans la composition d'innombrables protéines. Les groupes -SH jouent un rôle dans les catalyses au niveau des sites enzymatiques. La carence en S est une des plus sévères, un des symptômes est la disparition de la chlorophylle (chlorose) dont la synthèse n'est plus assurée (Heller *et al.*, 1998).

Le magnésium est un élément qui entre dans la composition de la chlorophylle. Sa présence est donc indispensable au déroulement de la photosynthèse. C'est aussi, un agent activateur par excellence de nombreuses réactions enzymatiques liées à de l'énergie (ATP). Un manque de (Mg) provoque la chlorose (Mazliak, 1998).

Un autre élément minéral important, le fer dont les besoins des plantes sont si importants (en solution environ  $10\text{mg.l}^{-1}$ ) qu'il est souvent classé parmi les macroéléments. Le fer entre dans la constitution de plusieurs protéines catalytiques assurant les oxydoréductions. Les plus fréquentes sont les hémoprotéines dont le groupement prosthétique est l'hème. Un autre groupe est celui des protéines fer-soufre (protéines Fe-S) dont la ferrédoxine fait partie (Heller *et al.*, 1998).

Le calcium également s'est révélé nécessaire au bon déroulement des mitoses. Les parois cellulaires des végétaux fixent de grandes quantités de Ca (on peut trouver jusqu'à 70 % du contenu en Ca d'une plante immobilisé dans les parois) (Mazliak, 1998).

D'autres oligoéléments se trouvant sous forme de traces dans les végétaux, jouent également des rôles essentiels dans la physiologie des plantes. Il s'agit:

- du cuivre (Cu), qui agit comme le fer par son changement de valence ( $\text{Cu}^+/\text{Cu}^{2+}$ ) et participe à la catalyse de certaines oxydoréductions. Il est un constituant du cytochrome oxydase. On le rencontre aussi dans les transporteurs comme la plastocyanine. Enfin, rôle important du Cu mis récemment en évidence : constituant de la superoxyde dismutase (SOD) qui permet la destruction de l'ion superoxyde  $\text{O}_2^-$  toxique pour le métabolisme cellulaire (Heller *et al.*, 1998),

- du molybdène sous forme de ( $\text{MoO}_4^{2-}$ ) est souvent associé à une flavoprotéine à la réduction des nitrates,

- du manganèse (Mn) qui joue également un rôle dans diverses oxydoréductions. Les ferroprotéines des chaînes de transport des électrons sont souvent couplées à des protéines contenant du Mn. De plus on connaît des carboxylases ou des déshydrogénases qui exigent le Mn comme cofacteur (Mazliak, 1974),

- du bore sous forme d'ion borate ( $\text{H}_2\text{BO}_3^-$ ) est strictement indispensable aux végétaux chlorophylliens. La carence se traduit par des troubles dans le fonctionnement des méristèmes, la différenciation des organes dans les réactions des plantes à la lumière contrôlées par le phytochrome (Heller *et al.*, 1998).

## 6.2. Exigences climatiques

En matière de climat, les deux principaux facteurs capables d'influencer la croissance et le rendement de biomasse sont la température et les précipitations.

### 6.2.1. La température

La température est un agent qui conditionne l'ensemble des stades phénologiques et de développement. L'entrée en vie active des graines semées et mises à germer n'est possible et réalisable que si la température du sol est égale ou supérieure à  $0^\circ\text{C}$  ( $0$  à  $3^\circ\text{C}$ ). C'est ce qu'on appelle le zéro de végétation. La température requise pour la levée et le tallage est de  $13^\circ\text{C}$ . La température idéale pour la floraison, étape importante pour la production végétale est

comprise entre 17 et 19°C. Dans le même ordre d'idées, un semis précoce ou trop tardif fait coïncider ce stade avec des températures trop basses ou trop élevées et provoquerait l'avortement des fleurs ou de la coulure. La température a également une action directe sur la respiration cellulaire et la photosynthèse, elle agit également sur la transpiration et modifie la consommation d'eau. La température optimum pour assurer une bonne production végétale se situe entre 22 et 25°C. Celle-ci favoriserait et activerait les réactions métaboliques en agissant sur les enzymes impliquées dans la translocation des photosynthétats.

### 6.2.2. L'eau

L'eau est aussi un facteur climatique important dans la croissance des céréales. Constituant essentiel des plantes, l'eau intervient dans le transport des éléments nutritifs et dans de nombreuses réactions métaboliques (photosynthèse et respiration). Il a également une action directe sur la production: en croissance active si l'eau est facteur limitant, la production de matière sèche (M.S) est plus faible.

Normalement, les régions où la hauteur des précipitations est comprise entre 600 et 800mm peuvent assurer facilement de bons rendements, seulement l'eau qui tombe du ciel est mal répartie sur le sol à travers les saisons (Figure.5). Elle est bien concentrée dans la saison pluvieuse d'hiver et que des déficits hydriques apparaissent à des moments critiques (fin du printemps) et qui compromettrait la phase de floraison –fructification.

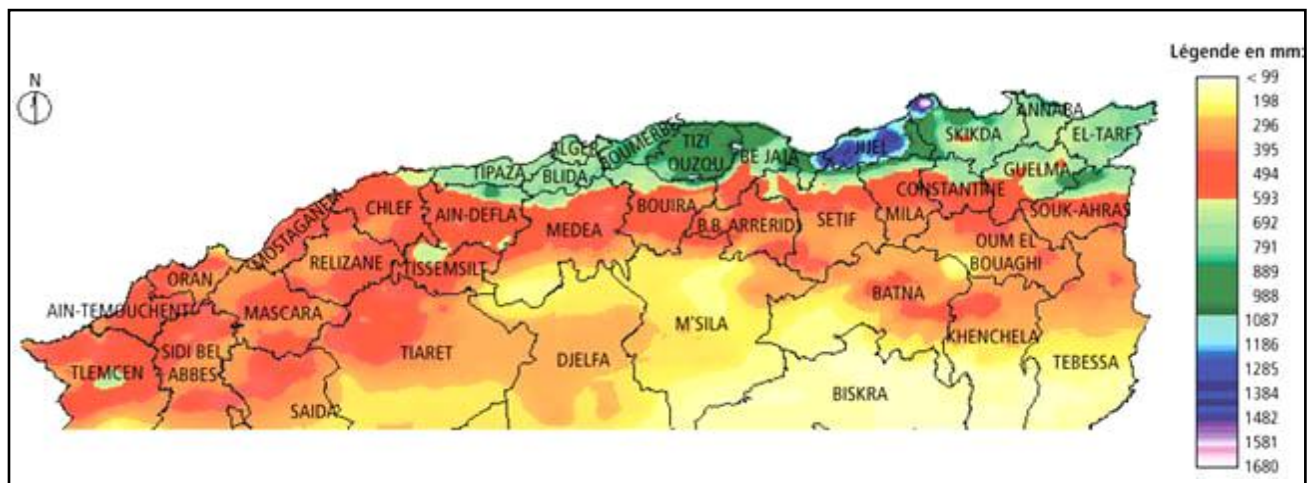


Figure.5 : Répartition des précipitations dans le Nord de l'Algérie.

## **7. Situation de la céréaliculture algérienne**

### **7.1. Surfaces réservées et zones de production**

Le blé dur et tendre cultivés chaque année en Algérie occupent une superficie globale de l'ordre de 1.785.200 ha de la S.A.U (Surface Agricole Utile), cette superficie est divisée en cinq (05) zones de culture:

- la zone de culture littorale: cette zone est caractérisée par un climat doux et une pluviométrie comprise entre 600 et 800 mm de pluie par an. Cette zone favorable aux cultures intensives occupe 18% de la surface cultivée soit 323.000 ha,
- la zone sub- humide est comprise entre les isohyètes 500 et 600 mm occupe 6% de la surface cultivée soit 107.000 ha,
- la zone des hauts plateaux (hautes plaines) caractérisée par des hauteurs de précipitations comprises entre 400 et 600 mm, zone de prédilection de la production céréalière en Algérie, occupe 48% de la surface cultivée soit 845.000 ha,
- la zone comprise entre les isohyètes 400 et 500 mm, correspond aux plaines basses telliennes, occupe 269.000 ha, soit l'équivalent de 15% de la surface emblavée,
- la zone comprise entre les isohyètes 400 et 350 et moins de 350 mm de pluie par an, occupe une surface de 251.000ha, soit 14% de la SAU réservée aux céréales.

### **7.2. Production et rendement**

Le blé est la graminée la plus cultivée en Algérie. Malgré les superficies importantes réservées chaque année à cette spéculaton prédominante, la production et les rendements à l'hectare demeurent faibles et ne couvrent pas les besoins de la population algérienne qui sont estimés à 100 millions de quintaux/an en 2000 (Anonyme, 2000).

Les rendements de la production sont faibles et oscillent entre 15 à 24 quintaux /ha dans les meilleurs zones de production à savoir les hauts plateaux, comparativement à d'autres pays exportateurs, pourtant des expériences pilotes conduites dans des régions défavorables à la céréaliculture ont produit des rendements de l'ordre de 85 quintaux /ha (Qassi Touil, Ourgla, Désert Algérien).

L'Algérie importe entre 5 et 7 millions de tonnes de céréales/an selon la production locale. De ce fait elle est classée parmi les gros pays importateurs dans le monde. Ceci prouve bien notre dépendance vis-à-vis de l'étranger en produits céréaliers payables en devises (5 à 6 milliards de dollars/an) et en denrées alimentaires (50 à 60 milliards de dollars US). Alors, il est temps peut être de dresser un tableau exhaustif des contraintes qui freinent ou bloquent la production des céréales en Algérie.

### 7.3. Variétés cultivées

Les variétés de blé dur et blé tendre cultivées en Algérie sont des espèces locales et introduites qui ont subies de nombreux essais de comportement et d'hybridations. En 1995, l'ITGC (1995) a dressé un catalogue des principales variétés de céréales cultivées en Algérie (Tableau 8). Il est aussi, judicieux de signaler que certaines variétés ont tout simplement changé de nom après plusieurs essais de comportement, parfois les noms sont tout simplement « Algérianisés ». En revanche, plusieurs autres variétés ont été sélectionnées d'une manière scientifique et laborieuse, malheureusement ces dernières n'ont pas été adoptées par les agriculteurs sous prétexte qu'elles ne répondent pas à leurs préoccupations.

**Tableau.8 : Liste des blés durs et tendres mentionnées par L'ITGC, (1995)**

N°	Variété ou population	Observations
<b>Blés durs</b>		
01	Aribs (ex. Capelli)	Origine Italie 1976, Sélection ITGC
02	Bibans (ex. Montpellier 37.856)	Origine France Montpellier (1965)
03	Bidi 17	Ancienne sélection de Guelma
04	Chougrane (ex. Polonicum)	Origine INRA France, sélection ITGC 1973
05	Guemgoum R'khem	Origine Tiaret
06	Hedba 3	Locale (sélection 1921)
07	Hoggar (ex. Vitron)	Introduite d'Espagne, sélection ITGC
08	Mohamed Ben Bachir	Locale (sélection 1931)
09	Oued Zenati368	Ancienne sélection (à Guelma en 1936)
10	Rahouia 80 (Gloire de Mongolfier)	Ancienne variété locale (origine Tiaret)
11	Righa (ex. Cocorit 71)	Origine CIMMYT, sélection ITGC Sétif
12	Sahel 77	Origine CIMMYT, sélection ITGC 1977
13	Sebaou (ex. INRAT 69)	Origine INRA Tunisie, sélection ITGC
14	Tassili (ex. Mexicali)	Origine CIMMYT, sélection ITGC
15	Waha'S'	Sélection ICARDA
16	Zibans (ex. ZB x FO)	Sélection ITGC Sétif

<b>Blés tendres</b>		
01	Ain Abid(ex.AS81.189A)	Introduite d'Espagne
02	Anza	Origine USA, sélection ITGC
03	Arz	Origine CIMMYT, sélection ITGC (El Khroub)
04	Chellif (ex. Pavon S)	Origine CIMMYT, sélection ITGC 1978
05	Florence Aurore7193	Sélection sur Florence x Aurore588en Tunisie 1930
06	Hiddab (ex.Nelkart)	Origine CIMMYT, sélection ITGC Sétif
07	Hodna (ex. Acsad59)	Origine Acsad, sélection ITGC (Tiaret)
08	Isser (ex. Zeegoon)	Origine ICARDA, sélection ITGC Sétif
09	Mahon Demias	Origine Iles Baléares, ancienne sélection (Sidi Bel Abbes)
10	Mimouni	Origine CIMMYT, sélection ITGC (Sidi Bel Abbes)
11	Nesser	Origine ICARDA, sélection ITGC (Sidi Bel Abbes)
12	Rhumel (ex. Siete Cerros)	Origine CIMMYT, sélection 1973
13	Sidi Okba (ex. Sham4)	Origine ICARDA, CIMMYT, sélection ITGC (Sidi Bel Abbes)
14	Soummam (ex.Douga x BJ S)	Origine CIMMYT, sélection ITGC (El Khroub et Sétif)
15	Stampelli	Origine Italie, sélection ITGC en 1974
16	Tessalah (ex. Mexicano 1481)	Origine CIMMYT, sélection ITGC (Sidi Bel Abbes 1979)
17	Ziad	Sélection en 1982 dans la pépinière SEPTON
18	Zidène	Origine ICARDA, sélection ITGC (Sidi Bel Abbes 1989)

Par ailleurs, dans le début des années soixante-dix (1970), et la restructuration de l'agriculture avec la création de domaines autogérés et de la révolution agraire, l'introduction d'importantes variétés étrangères dites à haut potentiel de rendement ou (haut potentiel génétique) a entraîné une régression massive de certains cultivars locaux. Sous ce régime de gestion, la production de semences de variétés locales a été interdite d'une manière informelle, un grand nombre d'espèces du terroir a pratiquement disparu. Certaines sont devenues rares et fort heureusement elles sont disponibles dans des banques de gènes dans des pays étrangers (USA, ex. URSS, France, ICARDA, CIMMYT). Cependant, certaines variétés locales se sont bien maintenues, ce sont généralement les cultivars assez bien adaptés tels que Hedba, Oued Zenati, Mohammed Ben Bachir et autres.

En outre, n'oublions pas, que si ces introductions ont entraîné une régression et une déperdition de certains cultivars locaux bien adaptés, elles ont constitué un apport génétique certain et intéressant selon les cas.

Selon Adelguerfi et Laouar (2000), c'est l'absence d'une stratégie claire, continue et soutenue de la sélection et l'amélioration des plantes qui n'a pas permis la préservation des cultivars locaux et une meilleure valorisation du potentiel génétique des espèces introduites.

Le CNCC (1998), a dressé une liste de cultivars de blé dur et de blé tendre autorisés à la production et la commercialisation. (Tableau. 9). Le constat est, seules quelques variétés anciennes figurent parmi le matériel végétal mentionné et donc certaines semblent avoir disparues ou fortement régressées.

Un autre constat alarmant qui touche la production des céréales en Algérie, est l'évolution nette vers la monoculture d'une seule variété. Selon Bensmaia (1998), durant la campagne 1997/1998, la variété Waha représente 54% des ventes par l'OAIC des semences de blés durs, les autres variétés sont faiblement représentées et occupent une place négligeable à l'exception de Mohammed Ben Bachir (14%) Polonicum (9%) Capetti (6%) et GTA dur (6%). La situation s'est encore aggravée en 1998/1999, Waha a atteint (64%) et Capetti (7.2%) Mohammed Ben Bachir (12%), GTA dur (5) et Polonicum (1%).

**Tableau.9 : Variétés de blé dur et de blé tendre autorisées à la production et à la commercialisation par le CNCC (1998)**

N°	Variétés de blé	Variétés de blé tendre
01	Ardente	Ain Abid
02	Aribs (Caoeli)	Anza
03	Belikh02	Ben Slimane (Arz)
04	Bibans (Montpellier37-856)	Chellif (Pavon)
05	Bidi 17	Florence Aurore 8193
06	Cham S	Hiddab (Neelkat HD1220)
07	Chen ' S'	Hodna (Acsad59)
08	Chougrane (Polonicum)	Isser (Zergoon, Ceinia)
09	Duriac	Mahon Demias
10	Eider	Mimouni (BTN°4)
11	GTA Dur	Nesser
12	Hedba 03	Rhumel (Siete Cerros)
13	Hoggar (Vitron)	Sidi Okba (Cham4)
14	Karim (Yavaros)	Soummam (Douga x Bjy)
15	Kebir	Stampelli
16	Mohamed Ben Bachir	Tessalah (Mexicano1481)
17	Ouarsenis	West Bred
18	Oued Zenati	Yacora Rojo
19	Oum Rabi	Ziad (Alondra)
20	Sahel	Zidane
21	Sebaou (INRAT69)	
22	Sersou (Simeto)	
23	Tassili (Mexicali75-Acsad 65)	
24	Waha 'S'	
25	Zibans (Zb x Fg)	

## **8. Les problèmes de la céréaliculture algérienne**

La céréaliculture est confrontée à de nombreux problèmes d'ordre technique et économique qui freinent son développement.

### **8.1. Ordre technique**

#### **8.1.1. Superficies réservées à la céréaliculture**

Les terres réservées à la céréaliculture algérienne sont relativement faibles. Elles sont de l'ordre de 1.785.000 ha sur une SAU pour les grandes cultures de 3 millions d'hectares pour 36 millions d'habitants. Cela signifie que presque la moitié de cette superficie est laissée en jachère, sol nu sans cultures. Pourtant ce n'est plus à démontrer qu'un sol nu est beaucoup plus exposé à sa perte par le phénomène de désertification et d'érosion hydrique. A titre d'information, en 1929 sous la colonisation, les surfaces cultivées par les céréales couvraient plus de 3 millions d'hectares. Toutes les céréales étaient représentées à l'exception du riz. Ceci a fait de l'Algérie coloniale le grenier de l'Europe (Ducellier, 1930).

#### **8.1.2. Choix des variétés utilisées**

Selon le CNCC(1998), sur trois (03) campagnes successives de 1995/96 à 1997/98, la variété Waha a occupé la plus grande superficie emblavée en semences de blé dur et s'est nettement distingué des autres cultivars. Ce problème de monoculture variétale pour les blés durs et tendres se pose aussi avec acuité pour les autres genres. Compte tenu des prix incitatifs encouragés et pratiqués par l'Etat pour la production de semences de ces deux (02) types de blés.

#### **8.1.3. La main-d'œuvre**

La céréaliculture intensive, nécessite une main d'œuvre importante en quantité et en qualité (spécialisée), de la mise en place de la culture jusqu'à la récolte. Or, en Algérie, on assiste à un vieillissement des ouvriers agricoles et leur non remplacement, causé par la fuite de la main d'œuvre jeune vers le secteur industriel ou du bâtiment plus lucratif et mieux rémunéré.

#### **8.1.4. La production de semences**

Les semences sont fournies par les OAIC de chaque Wilaya qui posent des problèmes d'approvisionnement et de transport. Dans certains cas, l'offre de cet organisme ne répond pas à la demande des céréaliculteurs.

#### **8.2. Ordre économique**

En Algérie, la céréaliculture n'est pas très rentable, si l'on veut produire à grande échelle. C'est une spéculation végétale qui nécessite des travaux d'entretien périodiques et précis, (fertilisation fractionnée au début tallage et montaison, traitements phytosanitaires préventifs avant et après l'installation des maladies, récolte mécanisée etc.). Les prix pratiqués ne sont pas très intéressants pour permettre aux agriculteurs de défalquer une plus-value de leur vente de produits afin d'acheter du matériel agricole et d'adopter le mode de production intensif des cultures. Bien que l'état a valorisé le prix du quintal de blé, passant de 1.800 D.A à 4.500 D.A, les producteurs ne s'intéressent pas d'avantage à cette production, car les charges ne sont pas couvertes toutes à 100 % avec la cherté des intrants (semences, fertilisants, produits phytosanitaires etc.).

### **9. Propositions et recommandations**

Pour donner un grand essor à la céréaliculture algérienne et améliorer la production et les rendements, un certain nombre de mesures doivent être prises:

- opter pour des systèmes mixtes de production semi- intensif et extensif, pour exploiter rationnellement les zones de production céréalière d'une part et d'autre part éviter les problèmes rencontrés dans les pays qui pratiquaient l'agriculture intensive (pollution et dégradation des sols),
- augmentation des superficies réservées à la céréaliculture, car 1.785.000 ha pour 36 millions d'habitants est insuffisante. En 1929, période coloniale, les surfaces cultivées par les céréales couvraient plus de 3 millions d'hectares pour une population locale d'à peu près 6 à 8 millions d'habitants. L'excédent des récoltes était exporté vers l'Europe. Durant cette période l'Algérie était considérée comme le grenier de l'Europe,
- suppression de la jachère et son remplacement par des cultures céréalières ou fourragères. La jachère, pratique ancestrale en Algérie subsiste et occupe toujours chaque année de grandes surfaces. Durant plus de 30 ans la part de la jachère dans la SAU n'a pas pratiquement changé et reste importante (Bedrani et *al.*, 2001). Un discours à sens unique a toujours

attribué à la jachère un rôle de frein à l'accroissement des productions agricoles notamment céréalières. Le lancement du Plan National de Développement Agricole (PNDA) en 2000, n'échappe pas à cette règle et propose aux agriculteurs des aides financières pour réduire la jachère et mettre en culture des spéculations végétales. Auparavant toutes les tentatives, plans successifs et programmes ont échoué et n'ont pas réussi à diminuer les superficies de la jachère (Bessaoud, 1994). Maintenant que les risques des sols nus non travaillés (en jachère) ne sont plus à démontrer: exposition aux agents de dégradation, de désertification et d'érosion hydrique dont les dégâts sont irréversibles ; il vaudrait mieux couvrir alors les sols, par une végétation de graminée ou à défaut de légumineuses. Ce deuxième type de plantes peut produire soit un fourrage de qualité pour l'élevage, soit des protéines alimentaires non négligeables pour les humains ou encore une amélioration des propriétés physico-chimiques du sol par l'augmentation de la stabilité des sols et leurs fertilités, par la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique de la légumineuse pour en faire profiter la culture suivante (Corre *et al.*, 1997),

- diversification des variétés utilisées et valorisation des ressources céréalières locales. L'utilisation d'un nombre indéterminé de variétés permettrait de maintenir ces cultivars et de les préserver de l'érosion génétique. De nombreuses variétés existaient dans l'Algérie pré indépendante (1961/1962). Des botanistes comme Trabut, Ducellier et Bœuf ont signalé la présence ancienne de forme de blé dur et blé tendre dans toutes les régions bioclimatiques allant du Nord, hauts plateaux voire même les milieux semi désertiques et oasiens.(Tableaux. 10). Par ailleurs, de nombreux écotypes locaux de blé 'dorment' dans des banques de gènes « étrangères ». Alors, il serait très important de les réutiliser dans des schémas de sélection pour leur réinstallation dans les zones à conditions extrêmes comme les milieux semi désertiques ou oasiens. Ces cultivars ou populations de terroir sont très bien adaptés aux conditions de chaque milieu écologique et répondent sûrement aux préoccupations et besoins locaux. Même si les rendements sont certes moins élevés que les variétés introduites, néanmoins, ils sont réguliers dans le temps et surtout plus élevés pendant les années sèches (production surtout de paille pour les animaux),

- utilisation des variétés selon leur vocation et le milieu,

- réintroduction de certaines variétés qui affichaient de bonnes performances agro techniques et qui malheureusement ont été délaissés par certains responsables peu scrupuleux du secteur.

**Tableau.10 : Sélections des blés durs et tendres mentionnés par Laumont et Erroux (1961,1962)**

N°	Variété ou population	Observation
<b>Blés durs</b>		
01	Adjini 9 et 19	Sélections Ducellier dans les populations locales de Constantine
02	Bidi 17	Sélection obtenue à Guelma dans les populations locales
03	Biskri AC2	Issu d'une sélection faite par les services botaniques de Tunisie parmi les blés durs originaire de Biskra
04	Boghar 8.25	Sélection ancienne, Boghar ou Chella se trouvent en mélange dans les populations décrites sous le nom de blé de Chevalier ou blé de Séville
05	Hedba 3	Sélection de Ducellier dans les populations locales
06	Labeter8.025	Sélection de Ducellier
07	Langlois 1.527	Sélection à Tasselent, une des formes de blés rouges de Tlemcen
08	Mahmoudi 8.041	Sélection de Ducellier dans les blés Mahmoudi
09	Mekki 16.410	Sélection dans les blés Mekki cultivés dans la région d'Ain Regada et Souk Ahras
10	Mohamed Ben Bachir 8.037	Sélection multipliée à partir de 1931
11	Oued Zenati 368	Sélection tirée des Bidis de la région d'O. Zenati (vulgarisé depuis 1936)
12	Pélistier	Sélection massale dans Hedba faite par un colon de Pont de Isser
13	Saba	Provient d'une hybridation entree le Syndiok x Mahmoudi tunisien et Zenati x Bouteille 13.953
14	Tessalah294	Sélection ancienne de Ducellier
15	Tlemcen 277	Sélection à partir des blés rouges de Tlemcen
16	Zenati x Bouteille 13.953	Isolé d'une hybridation réalisée à Ain Témouchent entre O. Zenati 368 et le blé dur précoce Bouteille
<b>Blés tendres</b>		
01	Mahon Demias	Assez résistant au gelées, Mahon850.8 un peu plus précoce, Mahon 57 et 11 variétés passe partout, Mahon 4 meilleure résistance à la rouille
02	Baroola 8791	Sélection dans le Baroola Australien
03	Pusa-Florence 380	Obtenu par le Prof. Bœuf en Tunisie à partir d'une hybridation du Prof. Schribaux
04	Florence–Aurore 8193	Crée en Tunisie, introduit en 1930-32 a remplacé les 2autres
05	Florence–Aurore 8189	Ressemble à F.A.8193
06	Florence-Aurore 8191	Diffère de F.A.8189 par son appareil végétatif
07	Aegilops 14227	Hybridation issue du croisement entre <i>Aegilops</i> x <i>Triticum durum</i> et de Florence x Aurore
08	Florence Mahon7356 x	Issue d'une hybridation ancienne (1928) entre Florence 290 et Mahon2
09	Pusa x Montana	Issue d'une hybridation entre le blé Pusa4, originaire d'Inde et le Montana (Stampelli)
10	Pumaflor	Hybridation de 1945 entre Pusa x Mentana et Florence x Aurore 8193

- construction des silos de conservation pour le stockage des récoltes et/ou les importations. Le ministère de l'agriculture et le développement rural (MADR) compte réaliser des silos de conservations au niveau des ports d'une capacité de 165 000 tonnes de produits céréaliers. Le

---

principal effort concernera sans doute le silo du port d'Alger qui sera le plus grand et le plus coûteux.

- organisation de la filière céréalière en Algérie. Les céréaliculteurs algériens doivent s'organiser en coopératives, véritables réseaux de producteurs et de conservateurs des récoltes comme c'est le cas aux USA et au Canada. L'achat, groupé d'intrants et de matériels lourds performants comme les tracteurs puissants, les charrues larges et les moissonneuses batteuses leur feront bénéficier de beaucoup d'avantages et d'économie. Avec des moyens rentabilisés et une bonne maîtrise de la conduite de la culture (époque de semis, période d'épandage d'engrais, traitement phytosanitaire, etc.), et un calendrier de travaux adéquat du passage du matériel agricole spécialisé, pour chaque agriculteur, les charges sont partagées et donc, ainsi réduites et peuvent dégager les excédents. Aussi dans les hautes plaines céréalières de ces pays, les producteurs de la filière (coopérateurs) pour les mêmes raisons ont construit des silos de stockage collectifs pour stocker dans des conditions idoines leur production et préserver leurs récoltes.

## CHAPITRE II LE PLOMB

### 1. Généralités

D'un point de vue physique, le terme « métaux lourds » désigne les éléments métalliques naturels, métaux ou dans certains cas métalloïdes (environ 65 éléments), caractérisés par un numéro atomique supérieur à 20 (Raskin *et al.*, 1994). Les métaux lourds désignent selon Elmsly (2001), des éléments chimiques toxiques dont la masse volumique est supérieure à  $5 \text{ g.cm}^{-3}$  (Adriano, 2001). D'un autre point de vue purement chimique, les éléments de la classification périodique formant des cations en solution sont des métaux. Ces éléments métalliques sont retrouvés naturellement dans l'environnement à des concentrations très faibles pouvant augmenter par l'activité anthropique, sidérurgique, l'exploration minière, les pratiques agricoles et aussi par la pollution atmosphérique générée par le transport routier et le trafic automobile (Prasad, 1999). D'un autre angle biologique, on en distingue deux types en fonction de leurs effets physiologiques et toxiques : métaux essentiels et métaux toxiques.

Les métaux essentiels sont des éléments indispensables à l'état de trace, une vingtaine (20) d'entre eux sont indispensables à de nombreux processus physiologiques et cellulaires majeurs, en particulier l'assimilation des nutriments du sol, le processus photosynthétique et la respiration cellulaire et qui se trouvent en proportion très faible dans les tissus biologiques (Loué, 1993 ; Kabata-Pendias and Pendias, 1992). Certains peuvent devenir toxiques lorsque la concentration dépasse un certain seuil. C'est le cas du cuivre (Cu), du nickel (Ni), du zinc (Zn), du fer (Fe). Par exemple, le zinc (Zn), à la concentration du millimolaire, est un oligo-élément qui intervient dans de nombreuses réactions enzymatiques (déshydrogénases, protéinases, peptidases) et joue un rôle important dans le métabolisme des protéines, des glucides et des lipides (Kabata-Pendias and Pendias, 1992). Ces métaux sont aussi impliqués dans des réactions moléculaires de synthèse de protéines, des acides nucléiques, des substances de croissance, de la chlorophylle des métabolites secondaires, notamment le métabolisme lipidique ou la tolérance au stress (Rengel, 1999). En revanche, certains éléments traces peuvent jouer encore un rôle important d'accepteurs ou de donneurs d'électrons indispensables à de multiples systèmes enzymatiques pour mettre en jeu des réactions d'oxydoréductions (Chaignon, 2001).

Les métaux toxiques ont un caractère polluant avec des effets toxiques pour les organismes vivants même à faible concentration. Ils sont considérés comme des métaux « non essentiels », qui n'ont aucun effet bénéfique connu pour la cellule et la fonction physiologique. C'est le cas du plomb (Pb), du mercure (Hg), du cadmium (Cd). Le terme métaux lourds, « Heavy metals », implique aussi une notion de toxicité. Le terme « éléments traces métalliques » est aussi utilisé pour décrire ces mêmes éléments, car ils se retrouvent souvent en très faible quantité dans l'environnement (Baker et Walker, 1989) et restent considérés comme des poisons cellulaires pour lesquels les concentrations tolérables par les plantes sont très faibles (Rengel, 1999 ; Prasad, 1999). En outre, de nombreux chercheurs s'accordent sur le fait que leur toxicité ne découle pas de leur accumulation et de leur concentration dans le sol, mais de leur fraction bio disponibles pour les plantes (Scheifler et *al.*, 2003 ; Dazy, 2008). Dans ce contexte, nous utiliserons le terme « métaux lourds » dans le sens de l'impact toxique sur les humains et l'environnement.

## **2. Historique de l'utilisation du plomb**

L'homme a utilisé le plomb depuis l'antiquité (plus de 7.000 ans), en raison de sa grande diffusion, sa facilité d'extraction, sa grande malléabilité et de son bas point de fusion. L'homme a extrait du plomb des minerais et l'a introduit dans la biosphère et tous les milieux en quantité croissante, sous diverses formes. Le plomb a été largement utilisé en premier, par la civilisation grecquo-romaine pour les pièces de monnaie, des toitures etc. Ensuite, pendant la première moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, l'utilisation du plomb a explosé et connu un grand essor au cours de la révolution industrielle. L'utilisation du plomb s'est généralisée dans des secteurs industriels très variés : canalisations de distribution des eaux, extractions minières, imprimerie, peinture, installations de transformation ou de recyclage des déchets, soudures, sertissage, tir et chasse. Dans la deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, le plomb a été ajouté aux carburants comme agent antidétonant et améliorant de l'indice d'octane de combustion puis aux accumulateurs de voitures et véhicules industriels, il est également utilisé dans l'industrie de l'armement et les munitions.

Au cours de ces dernières années l'intérêt des toxicologues pour le plomb a augmenté en raison des multiples pollutions dues aux conditions techniques de la vie moderne. Actuellement c'est l'un des polluants les plus répandus dans notre environnement. Il peut agir en synergie avec d'autres éléments traces métalliques toxiques comme, le cuivre, le cadmium, le mercure et le sélénium qui sont aujourd'hui trouvés dans les couches récentes labourées à des taux de 84 % à 225 % plus élevés que dans les sols sous-jacents a priori pas ou peu

pollués. Le plomb n'est pas biodégradable. Il est plus mobile et écotoxique dans les milieux naturellement acides ou touchés par l'acidification anthropique. A cause de sa toxicité, les rejets de plomb sont contrôlés de nos jours et les principales utilisations (essence et peinture) sont interdites dans certains pays mais il est toujours utilisé dans la fabrication des batteries.

Par ailleurs, la prise en compte des problèmes environnementaux et de santé publique et le développement de nouvelles technologies, ont conduit à la diminution voire l'arrêt total de certaines industries utilisant le plomb, comme la peinture les canalisations, la soudure, les pesticides, le carburant (essence sans plomb SP 95, SP 98).

### 3. Propriétés du plomb

Le plomb, du latin *Plumbum* est un métal mou qui n'a ni goût ni odeur typique. Ses caractéristiques lui donnent des qualités mécaniques exceptionnelles et permettent sa grande utilisation dans l'industrie. C'est un élément de la famille des cristallogènes de symbole chimique Pb et de numéro atomique 82. Le plomb, a une masse atomique de  $207,2 \text{ g.mol}^{-1}$ , possède une densité élevée de  $11,3 \text{ g.cm}^{-3}$  et un point de fusion de  $327^\circ\text{C}$ . Sa température d'ébullition est d'environ  $1700^\circ\text{C}$ . C'est un élément non dégradable (Morlot, 1996). Il appartient au groupe IV.b du tableau périodique des éléments (Tableau.11). De configuration électronique (Xe)  $4f_{14}5d_{10}6s_26p_2$ , il possède deux électrons non appariés sur sa couche électronique externe ce qui lui permet des degrés d'oxydation (+2) et (+4). Le cation ( $\text{Pb}^{2+}$ ) est un acide de Lewis au sens large, c'est à dire capable d'accepter deux électrons provenant d'une base, pour former une liaison covalente. C'est aussi une espèce chimique chargée, susceptible d'interagir avec des ions de charges contraires pour former des liaisons ioniques (Sposito *et al.*, 1982).

Tableau.11: Tableau des éléments périodiques de Mendeleïev

**CLASSIFICATION PERIODIQUE DES ELEMENTS**

**Légende**

- nombre de masse de l'isotope le plus abondant = nombre de nucléons
- nombre atomique = nombre de protons
- masse molaire atomique en g.mol<sup>-1</sup>
- symbole
- nom

Période	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII				
1 couche K	1 H Hydrogène																	2 He Hélium				
2 couche L	3 Li Lithium	4 Be Béryllium															5 B Bore	6 C Carbone	7 N Azote	8 O Oxygène	9 F Fluor	10 Ne Néon
3 couche M	11 Na Sodium	12 Mg Magnésium											13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphore	16 S Soufre	17 Cl Chlore	18 Ar Argon				
4 couche N	19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titane	23 V Vanadium	24 Cr Chrome	25 Mn Manganèse	26 Fe Fer	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Cuivre	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Sélénium	35 Br Brome	36 Kr Krypton				
5 couche O	37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdène	43 Tc Technétium	44 Ru Ruthénium	45 Rh Rhodium	46 Pd Paladium	47 Ag Argent	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Étain	51 Sb Antimoine	52 Te Tellure	53 I Iode	54 Xe Xénon				
6 couche P	55 Cs Césium	56 Ba Baryum	57 La Lanthane	58 Ce Cérite	59 Pr Praseodyme	60 Nd Néodyme	61 Pm Prométhée	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutécium					
7 couche Q	87 Fr Francium	88 Ra Radium	89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkélium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Moscovium	102 No Nobelium	103 Lw Lawrencium					

**Légende de classification :**

- Hydrogène (rouge)
- Métaux vrais (bleu clair)
- Métaux de transition (bleu foncé)
- "Métalloïdes" (jaune)
- Non métaux (orange)
- Gaz rares (vert)
- Lanthanides (bleu très foncé)
- Transuraniens (rouge foncé)

☆ = Métalloïde et parfois par symbole  
G = Gaz  
L = Liquide

## 4. Sources du plomb

### 4.1. Sources naturelles

#### 4.1.1. Le sol

Le plomb est un métal de couleur blanc gris argenté qui se trouve dans la croûte terrestre en petites quantités (0,002%) associé à plusieurs minerais dont les plus communs sont: la galène (PbS), la cérusite (PbCO<sub>3</sub>) et l'anglésite (PbSO<sub>4</sub>), (Adriano, 2001).

Le problème principal avec les métaux lourds comme le plomb, le cadmium, le cuivre et le mercure est qu'ils ne peuvent pas être biodégradés, et donc persistent pendant de longues périodes dans des sols. Leur présence dans les sols peut être naturelle ou anthropogénique. Comme les autres métaux lourds, le plomb est naturellement présent dans les roches (Tableau.12), il est libéré lors de l'altération de celles-ci pour constituer le fond géochimique (Bourrelier et Berthelin, 1998). La concentration naturelle de ces métaux lourds dans les sols varie selon la nature de la roche, sa localisation et son âge. Dans le sol, le Pb peut se retrouver sous forme ionique, dissoute, ou liée plus ou moins fortement aux particules (Raskin et Ensley, 2000).

**Tableau.12: Principaux minéraux et composés de plomb (BRGM, 2004 in Cecchi, 2008)**

N°	Nom	Formule
1	Plomb	Pb
2	Galène	PbSO <sub>4</sub>
3	Anglésite	Pb <sub>5</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>11</sub>
4	Boulangérite	Pb <sub>5</sub> Sn <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub> S <sub>14</sub>
5	Franckéite	PbCO <sub>3</sub>
6	Cerussite	(PbO) <sub>3</sub> .(CO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O
7	Hydrocerussite	PbCO <sub>3</sub> , PbCl <sub>2</sub>
8	Phosgénite	PbCrO <sub>4</sub>
9	Crocoïte	PbO
10	Massicot	Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
11	Minium	PbO <sub>2</sub>
12	Dioxyde de plomb	PbO <sub>2</sub>
13	Hydroxyde de plomb	Pb(OH) <sub>2</sub>
14	Chlorure de plomb	PbCl <sub>2</sub>
15	Bromure de plomb	PbBr <sub>2</sub>
16	Pyromorphite Pb5	(PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Cl
17	Hydroxypyromorphite	Pb <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> OH
18	Fluoropyromorphite	Pb <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> F
19	Arséniate de plomb	Pb <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>
20	Plumbogummite	PbAl <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>5</sub> , H <sub>2</sub> O
21	Raspite	PbWO <sub>4</sub>
22	Wulfénite	PbMoO <sub>4</sub>
23	Vanadinite	Pb <sub>5</sub> (VO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Cl

#### 4.1.2. L'eau

L'eau contient du plomb en quantité très variable. On le trouve dans les eaux souterraines à des teneurs de l'ordre de 1 à 60 µg.l<sup>-1</sup>, dans les lacs et cours d'eau de 1 à 10µg.l<sup>-1</sup> et 0.08 à 0.4µg.l<sup>-1</sup> dans les eaux marines. Même si certains sédiments marins contiennent jusqu'à 200mg de Pb par Kg, la contribution océanique du Pb à la contamination de l'atmosphère reste négligeable.

### 4.1.3. L'air

L'air atmosphérique contient une quantité de Pb relativement faible. Des mesures effectuées au-dessus du Groenland en 1970, indiquent des valeurs inférieures à  $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Ce plomb naturellement contenu dans l'atmosphère provient surtout de l'érosion éolienne des roches et des sols comme le montrent les mesures du Pb accumulé dans les glaciers du Groenland et de l'antarctique.

## 4.2. Origine anthropique

La source majeure de contamination de l'atmosphère, des écosystèmes terrestres et aquatiques est d'origine anthropique. Au cours de ces dernières décennies, l'apport de métaux lourds au sol dans le monde s'est étendu d'une manière exponentielle. Leurs émissions ont été estimées à 22.000 tonnes de cadmium, 939.000 tonnes de cuivre, 783.000 tonnes de plomb et 135.000 tonnes de zinc (Singh *et al.*, 1997). L'accumulation de Pb, provenant des retombées atmosphériques, ou de déchets contaminés déposés sur le sol, se fait principalement dans les horizons de surface (Steckeman *et al.*, 2000) et plus précisément dans les horizons riches en matière organique. Les teneurs en Pb diminuent, ensuite, plus en profondeur (de Abreu *et al.*, 1998). Ceci s'explique par le fait que le Pb est peu mobile. Étant principalement associé aux argiles, aux oxydes, aux hydroxydes de fer et à la matière organique, il n'est mobile que lorsqu'il forme des complexes organiques solubles et/ou que le sol a dépassé sa capacité d'absorption pour le Pb (Morlot, 1996 ; Raskin et Ensley, 2000).

### 4.2.1. Plomb d'origine industrielle et agricole

Les principaux types de pollutions anthropiques responsables de l'augmentation des flux de métaux, sont la pollution atmosphérique (rejets urbains et industriels), la pollution liée aux activités agricoles et la pollution industrielle. Ils proviennent principalement des industriels qui extraient et purifient le Pb naturel des roches telles que la galène (PbS), la cérusite (PbCO<sub>3</sub>), l'anglésite (PbSO<sub>4</sub>) ou les minerais mixtes de plomb et de zinc s'accompagne généralement par d'une pollution local au niveau du sol. C'est surtout lors de la fonte et du raffinage que les émissions plombières sont engendrées.

La pollution atmosphérique résulte également, de l'industrie des accumulateurs électriques (batteries) qui consomment des tonnages importants de plomb (45% du plomb raffiné) mais n'entraînant pas de pollution importante car il y'a un recyclage du plomb. En revanche, d'autres utilisations du plomb dans l'armement (munitions), la peinture, la soudure, entraînent une grande dispersion du plomb dans l'environnement.

Certaines pratiques agricoles sont à l'origine de l'introduction de métaux lourds dans le sol. Les produits destinés à améliorer les propriétés physico-chimiques du sol comme les fertilisants sont souvent plus riches en métaux lourds que le sol lui-même, par exemple les engrais, les composts et les boues résiduelles de station d'épuration (Robert et Juste, 1999). La pollution industrielle provient aussi des usines de production de matières organiques et graisses (industries agro-alimentaires), des produits chimiques divers (industries chimiques), les matières radioactives (centrales nucléaires, traitement des déchets radioactifs) et la métallurgie (Godin *et al.*, 1985). Les déchets miniers et les terrils industriels sont une source particulièrement importante de pollution par le zinc, le plomb et le cadmium. Il faut distinguer les apports diffus aériens d'origine lointaine des apports massifs localisés d'origine proche. Dans les apports diffus sont classés les poussières et aérosols provenant des chauffages ainsi que des moteurs d'automobiles. Les apports massifs localisés résultent d'apports anthropiques accidentels liés aux activités industrielles sans protection efficace contre la dispersion dans l'environnement (Baize, 1997).

Le rôle des pratiques industrielles et agricoles dans la contamination des sols doit être pris en compte : cela concerne une grande partie du territoire. Leur accumulation et leur transfert constituent donc un risque pour la santé humaine via la contamination de la chaîne alimentaire, mais aussi pour le milieu naturel dans son ensemble (Bourrelier et Berthelin, 1998).

#### 4.2.2. Plomb d'origine automobile

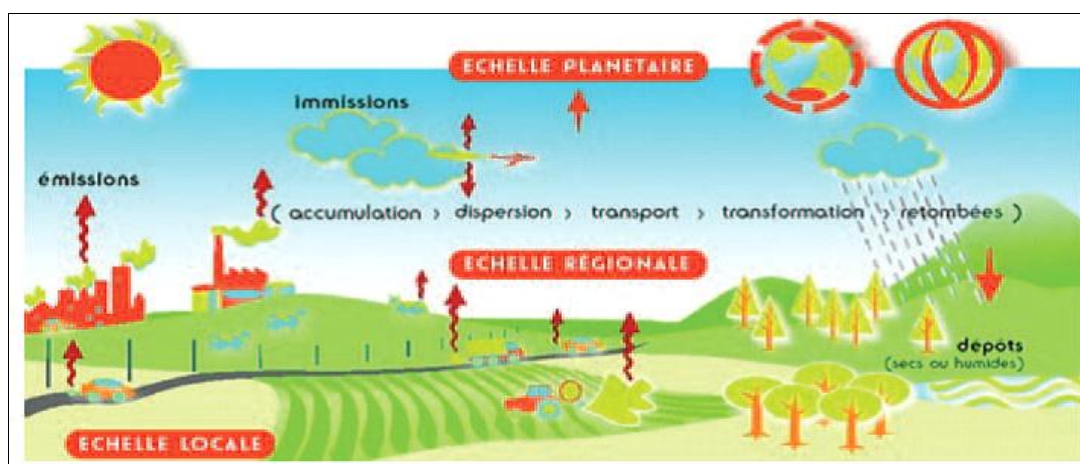
L'adjonction du plomb dans les carburants sous forme de tétraéthyle de plomb ( $\text{PbCH}_3$ )<sub>4</sub> puis du plomb tétraméthyle  $\text{Pb}(\text{CH}_3)_4$  (Micegary, 1980) entraîne un rejet important de plomb dans l'atmosphère. On estime à 450.000 tonnes de Pb rejeté par an, suite à la circulation automobile. En ce qui concerne l'Algérie, la quantité de plomb ajouté à l'essence est de  $0.45\text{g.l}^{-1}$  alors que dans d'autres pays avant de supprimer cet usage dans le carburant prévoyait  $0.40\text{g.l}^{-1}$  depuis 1970. L'estimation du rejet de plomb dans la région d'Annaba est de 140Kg de Pb par jour qui contaminent l'atmosphère (Semadi, 1989).

#### 4.2.3. Cycle géochimique du plomb

Le plomb retrouvé dans l'environnement est à la fois d'origine naturelle et anthropique. Le métal est présent dans le sol, mais également dans tous les autres compartiments de l'environnement: eau, air et même les êtres vivants. Le plomb a une teneur moyenne dans la croûte terrestre de 0,002% (36<sup>ème</sup> élément), il est présent dans la plupart des

roches mères. La présence naturelle du plomb dans le sol est essentiellement due à sa mise en disponibilité par les processus d'altérations chimiques. En quantité plus faible, le plomb peut être libéré dans l'atmosphère lors de l'activité volcanique ou lors de feux de forêt, et être déposé sur les sols par des retombées atmosphériques. En l'absence de toute action anthropique, les teneurs naturelles moyennes des sols en plomb sont de  $32 \text{ mg. Kg}^{-1}$  (Pais and Benton Jones, 2000).

Le plomb est un élément réputé peu mobile dans le sol par rapport à d'autres métaux en traces tel que le cadmium (Bourrelrier ou Bartholin, 1998). Son cycle géochimique dépend des caractéristiques physico-chimiques du sol. Le plomb va être stocké en grande partie dans le sol et tend à former des complexes particulièrement stables. Toutefois une fraction mobile peut également être absorbée par les organismes vivants (microorganismes du sol, végétaux...) et rentrer ainsi dans la chaîne alimentaire. Une petite partie de ce plomb peut également être entraînée dans les rivières et les lacs, lors du processus d'érosion qui arrachent les particules du sol liées au plomb et les entraînent par ruissellement vers les hydro systèmes de surface. Il existe donc un véritable cycle biogéochimique du Pb (tout comme il existe un cycle pour les éléments majeurs et les autres éléments traces) qui peut être schématisé comme sur la figure 6 et au cours duquel le Pb change de compartiment et de forme chimique sous l'influence de processus naturels ou anthropique.



**Figure.6 : Cycle géochimique naturel et anthropique du plomb dans la nature.**

### 5. Facteurs influençant la phytodisponibilité du plomb

La toxicité d'un métal dépend de sa spéciation (forme chimique) autant que des facteurs environnementaux (Babiche, 1980). Dans le sol, les métaux lourds peuvent exister sous forme d'ion libre ou sous forme liée à des particules de sol. Cependant, un métal n'est

toxique pour les organismes vivants que s'il est sous forme libre, il est alors bio disponible. Comme tout élément chargé positivement, les cations métalliques peuvent interagir dans le sol avec toute particule organique ou minérale chargée négativement. De l'équilibre entre les formes libres et fixées de l'ion va dépendre sa biodisponibilité, directement liée à sa toxicité. Enfin, la biodisponibilité des métaux lourds varie en fonction de plusieurs facteurs du sol. Parmi lesquels, la capacité d'échange de cation (CEC), le pH, le potentiel redox, la teneur en phosphate disponible, la teneur en matière organique et les activités biologiques.

Les argiles, de par leurs propriétés physico-chimiques, jouent un rôle très important dans la disponibilité des métaux lourds. Li et Li (2000), ont montré que les métaux lourds peuvent être absorbés et immobilisés par les minéraux argileux ou également être complexés par la matière organique du sol en formant alors un complexe organométallique (Lamy, 2002). En effet, la charge électro-négative des argiles les rend aptes à contracter des liaisons électrostatiques avec toute entité chargée positivement, comme les cations métalliques. Ces liaisons sont réversibles et les cations fixés sont échangeables: ils peuvent être remplacés par d'autres cations présents dans la phase aqueuse du sol. Cette capacité d'échange de cations (CEC) exprimée en milliéquivalents pour 100 g de sol est une caractéristique importante de chaque argile qui conditionne grandement la biodisponibilité d'un métal dans le sol.

## **6. Absorption du plomb par les plantes**

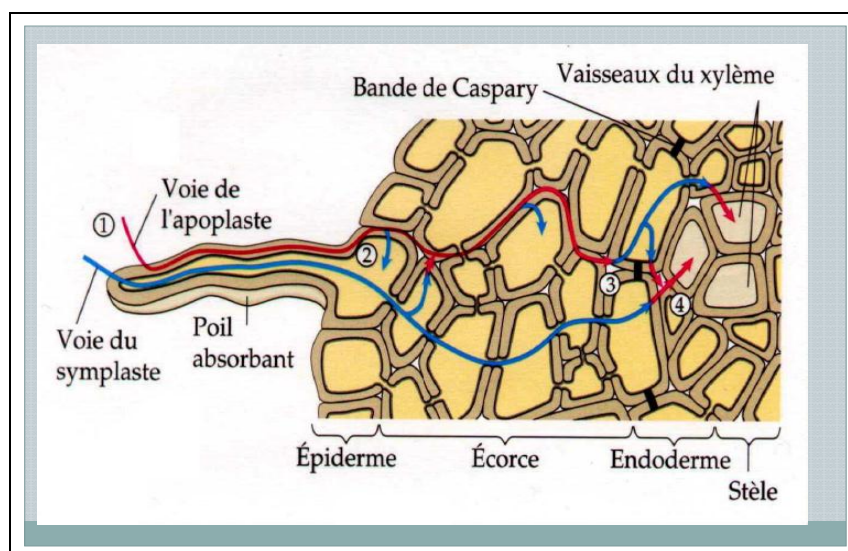
### **6.1 Absorption racinaire**

Le passage des métaux du milieu extérieur vers la plante se fait par simple diffusion au travers de l'apoplaste du cortex racinaire et de l'endoderme. Plusieurs études histologiques ont montré que le plomb était essentiellement transporté dans l'apoplaste, c'est-à-dire à travers les espaces intercellulaires et qu'il suivait les mouvements de l'eau dans la plante. Le transport des éléments métalliques à travers la paroi cellulaire se fait passivement (non métabolique et donc dans le sens du gradient de concentration) par les pores du réseau de la cellulose, de l'hémicellulose et des glycoprotéines. De ce fait, ces études ont porté essentiellement sur les céréales, comme l'orge et le blé (Tanton and Crowdy, 1971), le maïs (Tung and Temple, 1996b), ou les légumes, comme la laitue (Glater and Hernandez, 1972), le radis (Lane and Martin, 1977) et l'oignon (Wierzbicka, 1987). Ces travaux ont révélé que le plomb, après s'être fixé au rhizoderme, pénétrait dans le système racinaire de façon passive et suivait le système de conduction de l'eau, l'absorption n'est pas uniforme le long de la racine, puisqu'il existe un gradient de concentration en plomb dans les tissus à partir de l'apex, qui est la zone la plus concentrée (Tung and Temple, 1996b; Seregin *et al.*, 2004). Les tissus

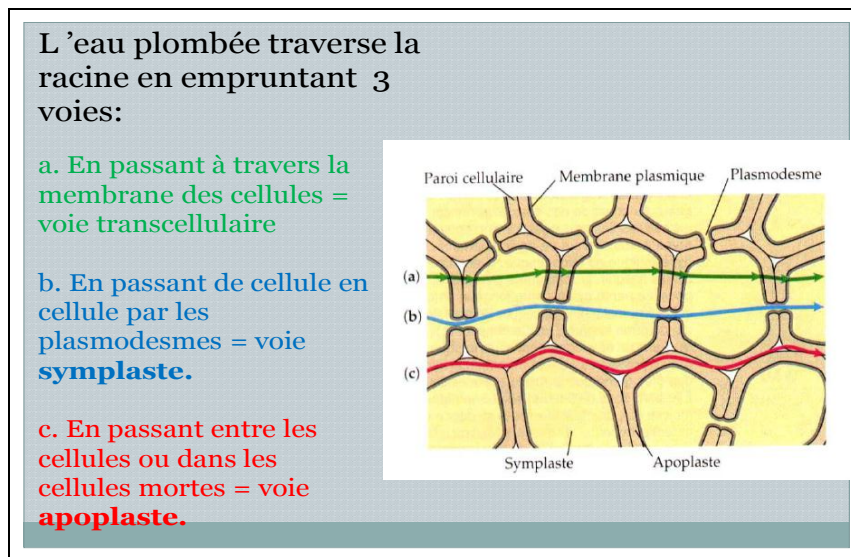
jeunes, et en particulier la zone apicale (en dehors de la coiffe) où les cellules possèdent des parois encore fines, sont les zones absorbant le plus de plomb (Wierzbicka, 1987; Tung and Temple, 1996b; Seregin *et al.*, 2004). Cette région apicale correspond également à la zone où le pH rhizosphérique est le plus bas. Ce pH bas favorise la solubilité du métal et conduit à une élévation locale de la concentration en plomb dans la solution du sol.

### 6.1.1. Voie apoplastique

Dès qu'il arrive au niveau de l'apoplaste (Figure.7A, 7B), le plomb peut migrer relativement vite. Des études sur l'oignon ont montré que son transfert s'effectuait à la vitesse d'une couche par cinq minutes (Wierzbicka, 1987). Chez le maïs, Seregin et Ivanov (1998), ont fait état d'une diffusion restreinte à l'épiderme et aux couches supérieures du cortex après vingt-quatre heures d'exposition au plomb et après quarante-huit heures d'exposition ce sont les tissus conducteurs qui sont atteints. Malgré que le plomb arrive à diffuser dans la racine et même à être transféré vers les parties aériennes, seule une faible fraction de ce dernier est mobile. Plus de 90% se trouve sous forme insoluble et est fortement lié aux enveloppes cellulaires externes (Wierzbicka *et al.*, 1999). Le plomb est principalement lié aux parois mais peut se trouver associé à la lamelle moyenne (Jarvis and Leung, 2001, 2002) ou à la membrane plasmique (Seregin *et al.*, 2004). Il peut être également précipité dans l'espace intercellulaire (Jarvis and Leung, 2001).



(A)



**Figure.7A et 7B: Les différentes voies de pénétration du plomb dans les cellules.**

### 6.1.2. Voie symplastique

Le transit du plomb par la voie symplastique se fait simultanément que par la voie apoplastique chez les végétaux (Lane et Martin (1978)). La quantité de ce métal passant par cette voie est faible par rapport à la voie apoplastique. Cependant, cette fraction qui passe par le symplaste est d'une importance capitale dans l'exercice de la toxicité du plomb car c'est elle qui provoque la majorité des effets nocifs et indésirables, observés chez les plantes contaminées par le plomb. En effet, à des doses non létales, le plomb s'introduit facilement et uniquement dans le symplaste dans les zones actives de divisions cellulaires, comme la zone des méristèmes apicaux (Tung and Temple, 1996) ou le protoderme (Wierzbicka, 1998). Car, en réalité les cellules jeunes sont en voie de différenciation et ne possèdent pas encore de paroi secondaire et tertiaire. Leur paroi primaire est très fine et mince et l'accès à la membrane plasmique est donc facilité dans ces zones racinaires. Le plomb symplastique peut se rencontrer dans certains compartiments cellulaires, comme les vésicules de l'appareil de Golgi (Malone *et al.*, 1974), les microtubules de la membrane plasmique (plasmotubules) (Wierzbicka, 1998), les vésicules du réticulum endoplasmique (Wierzbicka *et al.*, 2007) et les vacuoles (Malecka *et al.*, 2008 ; Meyers *et al.*, 2008 ). Par ailleurs, à des doses létales, le plomb envahit tous les tissus racinaires, et les membranes biologiques ne semblent plus assurer leur rôle de barrière physique (Seregin *et al.*, 2004) empêchant la pénétration massive

de ce polluant dans le cytoplasme, les organites qui possèdent même deux membranes comme les mitochondries et les chloroplastes et voire même le noyau (Małecka *et al.*, 2008).

## 6.2. Absorption foliaire

Bien que peu étudiée par rapport à l'absorption racinaire, l'assimilation du plomb par les feuilles peut représenter une part importante dans le taux de contamination de la plante. Du plomb peut être apporté sur les feuilles par des retombées atmosphériques, mais également dans les champs par des apports en engrais et pesticides (Pb sous forme d'impuretés). La majorité de ce plomb est lessivée, mais une partie va s'adsorber aux lipides épicuticulaires et être absorbé par les feuilles (Prasad and Hagemeyer 1999). La capacité des plantes à absorber le plomb disponible via leurs feuilles dépend à la fois de l'âge de celle-ci mais également de leur morphologie. Les feuilles pubescentes ont en particulier la capacité de fixer et d'absorber ce plomb (Godzik, 1993). Dans le cas de «légumes feuilles», comme l'épinard ou de céréales, comme le blé, exposés à de fortes retombées atmosphériques, la quantité de métal absorbée par les parties aériennes peut atteindre jusqu'à 95% de la quantité totale absorbée (Dalenberg and Van Driel, 1990).

## 7. Impact du plomb sur les végétaux

Le plomb dès qu'il arrive dans le végétal, il est rapidement séquestré dans les cellules. Néanmoins il cause beaucoup d'effets néfastes dans les plantes. Ces effets ont déjà fait l'objet de nombreuses recherches et publications (Singh *et al.*, 1997 ; Seregin et Ivanov, 2001 ; Patra *et al.*, 2004 ; Sharma et Dubey 2005). Il est important de souligner que ces effets varient en fonction de la durée de l'exposition, de l'intensité du stress, du stade de développement de la plante, des organes considérés et bien sûr des espèces étudiées voire des cultivars.

### 7.1. Effets sur la germination

Même à de faibles doses le plomb a des effets néfastes sur la plante, et c'est la germination qui est touchée en premier lieu, elle est fortement inhibée par les ions  $Pb^{2+}$  et ce à de très faibles concentrations (Mishra et Chaudhuri, 1998 ; Wierzbicka et Obidzinska, 1998 ; Tomulescu *et al.*, 2004). Des doses plus fortes conduisent à une inhibition totale de la germination chez les végétaux, comme le haricot dont le tégument de la graine ne limite pas assez la pénétration des ions  $Pb^{2+}$  (Wierzbicka et Obidzinska, 1998). Le plomb réduit également le développement de la plantule et des racinelles (Mishra et Chaudhuri, 1998), et même à de

faibles concentrations il inhibe la croissance des racines et des parties aériennes (Garland et Wilkins, 1981; Mishra et Chauduri, 1998; Wierzbicka, 1999; Makovski *et al.*, 2002, An 2006). Ce sont les racines qui sont le plus touchées, particulièrement les racines primaires qui sont plus sensibles que les racines latérales et plus la teneur en plomb est importante et plus l'inhibition est importante (Obroucheva *et al.*, 1998).

## 7.2. Effets sur la croissance

Comme sur la germination, les effets du plomb sont aussi visibles sur la croissance des végétaux. Globalement, le plomb affecte la croissance et la morphogénèse des plantes, en perturbant de très nombreux mécanismes physiologiques. Il inhibe fortement la croissance des plantes, entraînant la formation de plantes de taille réduite (nanisme). Les concentrations en Pb toxiques pour les végétaux varient considérablement selon les études. En effet, cette toxicité dépend essentiellement des interactions du Pb avec les espèces végétales considérées, de l'âge des plantes de la durée d'exposition, mais également du mode de culture et des facteurs environnementaux. De fortes doses de plomb diminuent la biomasse végétale et des doses plus faibles ralentissent leur croissance sans pour autant diminuer cette dernière (Mishra et Chauduri, 1998; Kosobrukhov *et al.*, 2004; Xiong *et al.*, 2006 ;Zheljaskov *et al.*, 2006). Malkovski et collaborateurs (2002) ont même montré un accroissement de la biomasse dans les zones racinaires contenant les plus grandes quantités de plomb, comme l'apex et la zone d'élongation. Cette augmentation de biomasse peut être aussi attribuée à la synthèse de nouveaux composants pariétaux (Wierzbicka, 1998). Au niveau morphologique, une exposition à une faible concentration de plomb entraîne le développement de racines plus courtes mais plus compactes. On peut observer aussi chez les végétaux des nécroses au niveau des apex racinaires ainsi que des chloroses foliaires dues à des expositions prolongées même à de faibles doses de plomb (Liu *et al.*, 2000). Le plomb induit rarement une mort des végétaux même à de fortes concentrations rencontrées dans l'environnement dans les sols miniers et à proximité des usines de retraitement de batteries etc. (Arshad *et al.*, 2008).

Par ailleurs, les travaux de Rooney *et al.*,(1999) ont montré que pour des concentrations extractibles à l'EDTA dans un sol atteignant 800 mg. Kg<sup>-1</sup>, la croissance du Ray-grass n'était pas affectée. Paivoke (2002), quant à lui, a montré que la toxicité du Pb vis-à-vis du pois dépendait fortement de l'âge de la plante en plus de la concentration en Pb dans le sol. Cependant, il reporte des effets néfastes sur la croissance des plantes pour des concentrations en Pb inférieures à 500 mg. Kg<sup>-1</sup>. Liu *et al.*, (2003) ont démontré que la

sensibilité ou la tolérance des plantes au Pb était cultivar-dépendante. En effet, leurs travaux réalisés sur différents cultivars de riz mettent en évidence des retards de croissance et de développement provoqués par  $800 \text{ mg. Kg}^{-1}$ , mais uniquement pour certains cultivars, d'autres n'y étant pas sensibles. Ceci démontre bien que la toxicité du Pb dépend fortement du comportement des plantes vis-à-vis de ce métal.

### 7.3. Effets sur le statut hydrique

De nombreux travaux scientifiques ont mis en évidence une perturbation importante du statut hydrique chez des plantes traitées au Pb. En effet, le plomb affecte l'état hydrique de la plante, en provoquant un stress hydrique, notamment par la fermeture des stomates qui provoquerait une diminution de la transpiration, y compris à de faibles doses, ainsi qu'une diminution de la teneur en eau (Barcelo and Poschenriedes, 1990; Wozny *et al.*, 1995; Sayed, 1999). Cette fermeture des stomates a un impact sur divers processus métaboliques de la cellule, telle que la photosynthèse en induisant une déficience en  $\text{CO}_2$ . Le stress hydrique s'exprime également par une réduction de la surface foliaire ainsi que sur tous les organes siège de la transpiration afin de limiter les pertes en eau. On observe ensuite un flux transpiratoire diminué, une pression osmotique plus faible ou un potentiel hydrique réduit dans le xylème. Le plomb provoque une perte globale de turgescence et de plasticité et enfin une réduction globale du contenu en eau de la plante (Parys *et al.*, 1998). Tous ces constats sont expliqués par la diminution de la croissance des feuilles qui conduit à un amoindrissement de la surface foliaire qui est la zone principale de transpiration de la plante (Iqbal and Mushtaq, 1987; Weryszko- Chmielewska and Chwil, 2005) et aussi, par la petite taille des stomates des plantes traitées au plomb, au niveau des feuilles, (Weryszko- Chmielewska and Chwil, 2005).

### 7.4. Effets sur la nutrition minérale

Le plomb affecte la nutrition minérale en perturbant le prélèvement et le transport des nutriments divalents tels que le  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{P}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  (Tableau.13) en bloquant leur entrée ou en se liant à eux les rendant indisponibles pour la plante (Xiong, 1997). Burzynski (1987), a montré que la présence du plomb entraînait une diminution du contenu en potassium dans tous les tissus du concombre ainsi qu'une diminution du calcium dans les cotylédons et l'hypocotyle, mais aussi du fer dans les racines. Le plomb affecte également le métabolisme azoté en diminuant le prélèvement de nitrate et en perturbant le fonctionnement de l'enzyme nitrate réductase (Seregin et Ivanov, 2008).

**Tableau.13 : Effets du plomb sur la concentration en éléments minéraux des parties aériennes et racinaires d'après Pourrut, (2008).**

Elément	Partie de la plante	Effet	Références
<b>Ca</b>	Aérienne	↓	Khan and khan 1983 ; Burzynski, 1987 ; Breckle and Ikhan , (1992) ; Csehet <i>al.</i> , (2002) ; Antosiewicz, (2005)
	Racinaire	↑↓	
<b>Cu</b>	Aérienne	↓	Khan and Frankland,(1983) ; Khan and Khan ,(1983) ; Burzynski and Grabowski, (1984) ; Paivoke, (2002) ; Sinha <i>et al.</i> ,(2006)
	Racinaire	↑↓	
<b>Mg</b>	Aérienne	↓	Khan and khan,(1983) ; Burzynski and Grabowski,(1984) ; Breckle and Khale, (1992) ; Csehet <i>al.</i> , Paivoke, (2002)
	Racinaire	↑	
<b>Fe</b>	Aérienne	↓	Khan and Frankland, (1984) ; Khan and Khan, (1983) ; Burzynski and Grabowski, 1984 ; Sinha <i>et al.</i> , (2006) ; Gopal and Rizvi, (2008)
	Racinaire	↑↓	
<b>Zn</b>	Aérienne	↓	Khan and Frankland, (1983) ; Khan and Khan, (1983) ; Cseh <i>et al.</i> , (2000) ; Gebelein <i>et al.</i> , (2000) ; Paivoke, (2002)
	Racinaire	↑↓	
<b>Mn</b>	Aérienne	↓	Khan and Khan,(1983) ;Burzynski and Grabowski,(1984) ; Breckle and Kahle,(1992) ; Csehet <i>al.</i> ,( 2000) ; Paivoke, (2002)
	Racinaire	↔	
<b>K</b>	Aérienne	↑↓	Khan and Khan, (1983) ; Breckle and Kahle, (1992) ; Malkowski <i>et al.</i> , (2002) ; Paivoke, (2002) ; Rucinska and Gwozdz, (2005)
	Racinaire	↓	
<b>N</b>	Aérienne	↓	Burzynski and Grabowski,(1984) ; Kevresan <i>et al.</i> , (2001) ; Malkowski <i>et al.</i> , (2002) ; Rucinska and Gwozdz, (2005) ; Xionget <i>al.</i> , (2006)
	Racinaire	↓	
<b>P</b>	Aérienne	↑↓	Gracia <i>et al.</i> , (2006) ; Sinha <i>et al.</i> , (2006) ; Gopal and Rizvi, (2008)
	Racinaire	↑↓	
<b>S</b>	Aérienne	↓	Paivoke, (2002) ; Sinha <i>et al.</i> , (2006) ; Gopal and Rizvi, (2008)
	Racinaire	↑↓	

**Légendes :** ↓ signifie que la concentration mesurée a diminué suite à un traitement au plomb, ↑ qu'elle a augmenté, ↔ qu'elle n'a été modifié ; ↑↓ signifie que les données disponibles sont contradictoires et ne permettent pas de dégager une tendance générale.

### 7.5. Effets sur la photosynthèse

Il est connu que la concentration en CO<sub>2</sub> est un facteur qui influence l'ouverture des stomates, une faible concentration provoque leur ouverture alors qu'une forte provoque leur fermeture. L'exposition des végétaux au plomb conduit à une inhibition de la photosynthèse, du rendement photosynthétique et à une limitation du taux d'assimilation du CO<sub>2</sub>. Cette inhibition s'explique par la diminution des teneurs en chlorophylle et en caroténoïdes (Khosobrukhov *et al.*, 2004; Irfan Qureshi *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2007; Gopal et Rizvi,

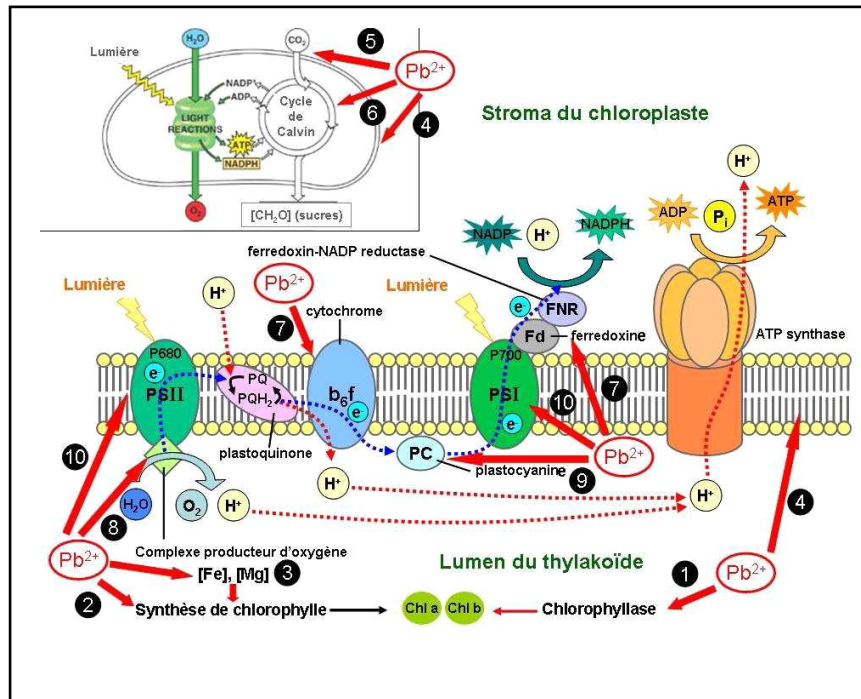
2008). La chlorophylle (b) semble plus sensible que la chlorophylle (a) (Kacabova et Natr, 1986; Stiborova *et al.*, 1986; Vodnik *et al.*, 1999). Toutefois, ces effets varient en fonction des espèces végétales.

Les mécanismes de réduction de la teneur des pigments végétaux sont, en partie, connus. Le plomb induit l'activité chlorophyllase dans les feuilles (Drazkiewicz, 1994). En effet, le mécanisme principal semble être l'inactivation de la synthèse de ces pigments. Le plomb interagit de deux manières :

- d'une manière directe, en se substituant aux ions divalents liés aux metalloenzymes. C'est l'exemple notamment de l' $\delta$  aminollevulinate déshydratase ou ALAD qui est à la base de la synthèse des chlorophylles et dont  $Zn^{2+}$  est remplacé par l'ion  $Pb^{2+}$ .
- d'une manière indirecte en provoquant une carence en ions divalents. Les chloroses foliaires sont généralement des défauts de pigmentations, généralement, signe d'un manque en fer ( $Fe^{2+}$ ) indispensable à la synthèse des chlorophylles (Foy *et al.*, 1978).

Signalons par ailleurs, que la réduction de l'activité photosynthétique est le plus souvent supérieure à la diminution observée dans les pigments. Ceci dénote bien que le plomb pourrait agir à d'autres niveaux cellulaires (Bazzaz *et al.*, 1975; Stirobova *et al.*, 1986; Poskuta *et al.*, 1988; 1996). Au niveau structural, le plomb modifie la structure des chloroplastes qui sont plus sensibles que les mitochondries (Choudhury and Panda, 2004; Weryszko-Chmielewska and Chwil, 2005; Islam *et al.*, 2007). Il induit également un changement et une modification de la composition des lipides membranaires chloroplastiques ce qui va altérer certaines propriétés physico-chimiques (Stefanov *et al.*, 1995). En pénétrant le chloroplaste, le plomb peut se stocker et se fixer sur la membrane chloroplastique et perturber ainsi la chaîne de transport des électrons (Figure.8).

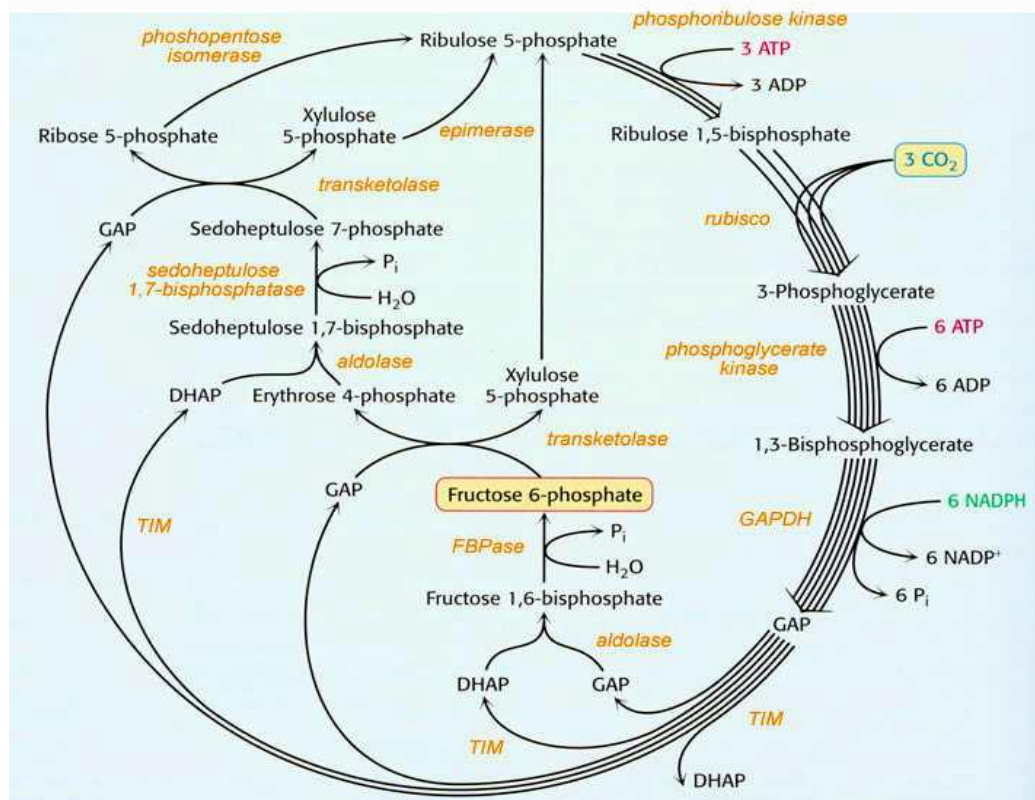
En revanche, en induisant la fermeture des stomates, le plomb limite d'une manière importante les échanges gazeux entre le système foliaire et le milieu extracellulaire. La chute du flux de  $CO_2$  pénétrant dans le chloroplaste peut être considérée comme la cause principale de la forte réduction de la fixation du  $CO_2$  observée et du rendement photosynthétique (Bazzaz *et al.*, 1975; Parys *et al.*, 1998).



**Figure. 8: Représentation schématique et simplifiée de la chaîne photosynthétique d'après Pourrut, (2008).**

Les interactions possibles avec le plomb sont indiquées par les flèches.

Notons aussi, que suite à la perturbation de la nutrition minérale et la diminution de la teneur de certains ions minéraux observée dans les tissus du mésophylle foliaire, le plomb perturbe l'activité des photosystèmes, notamment les enzymes de nature protéique qui contiennent le groupement Fe-S présent dans de nombreuses molécules intervenant dans le phénomène de photosynthèse (cytochrome b6f, ferredoxine). De plus le complexe producteur d'oxygène contient 4 atomes de Manganèse (Mn), la plastocyanine contient du cuivre (Cu) et les chlorophylles qui possèdent un noyau tétrapyrrolique avec un atome de magnésium (Mg) en son centre. Le plomb peut également inhiber certaines enzymes du cycle de Calvin (Figure.9).



**Figure.9 : Cibles des métaux lourds au niveau du cycle de Calvin (modifiée d'après Prasad, 1999 in Dazy, 2008).**

Abréviations: Rubisco, Ribulose 1,5 biphosphate carboxylase ; GAPDH, Glycéraldéhyde-3-phosphate déshydrogénase ; TIM, Triose Phosphate Isomérase ;FBPase, Fructose 1,6 biphosphatase ; GAP, Glycéraldéhyde-3-Phosphate ; DHAP, Dihydroxyacétone phosphate.

## 7.6. Effets sur les activités enzymatiques

Le plomb n'apparaît pas comme étant un élément nécessaire à la vie des plantes. Sur le métabolisme cellulaire, il peut inhiber l'action de certaines enzymes notamment celles qui possèdent un groupement -SH, ce dernier présentant une forte affinité pour celui-ci. Dans la plupart des cas, l'inhibition se fait par interaction du métal avec le groupement qui est indispensable pour l'activité et le bon fonctionnement des enzymes. Parmi les enzymes fondamentales qui peuvent être inhibée par le plomb, se trouvent des enzymes impliquées dans la biosynthèse de la chlorophylle ou bien de la Rubisco qui permet la fixation du CO<sub>2</sub> (Seregin et Ivanov, 2001 ; Parta *et al.*, 2004). Il affecte également les enzymes impliquées dans le cycle de Calvin (Baszinsky *et al.*, 1980; Prasad et Prasad, 1987; Prasad et Hagemeyer, 1999). Il peut également interférer dans les réactions énergétiques de la respiration cellulaire (Rolf 1973; Bazzaz *et al.*, 1974; Carlson et Bazzaz 1977; Clusters et Van Assche 1985). A forte dose, le plomb peut atténuer la respiration en affectant les membranes

mitochondriales et les chloroplastes, il peut aussi provoquer l'inhibition de l'ATP-synthétase (Koeppel and Miller., 1970; Bittel *et al.*, 1974). En revanche, il a été noté qu'il peut stimuler l'action de la ribonucléase, la désoxyribonucléase, la phosphatase acide, la peroxydase et l' $\alpha$ -amylase (Lee *et al.*, 1976; Maier, 1978a et 1978b). D'une façon globale, le plomb affecte donc la conformation de nombreuses enzymes, les empêchant de fonctionner convenablement (Seregin et Ivanov, 2001). L'inhibition de ce type d'enzyme entraîne une forte perturbation de la photosynthèse. Ceci entraîne une réduction de la teneur en chlorophylle ainsi que celle de tous les pigments photosynthétiques, et également une croissance réduite des feuilles (Kupper *et al.*, 1996). La photosynthèse reste de ce fait un des mécanismes les plus affectés par la présence du plomb. D'une manière générale, l'intervention des éléments traces métalliques (ETM) y compris le plomb, dans le métabolisme cellulaire provoquent l'inactivation ou l'activation de certains biocatalyseurs (Kar and Feyerabend, 1988).

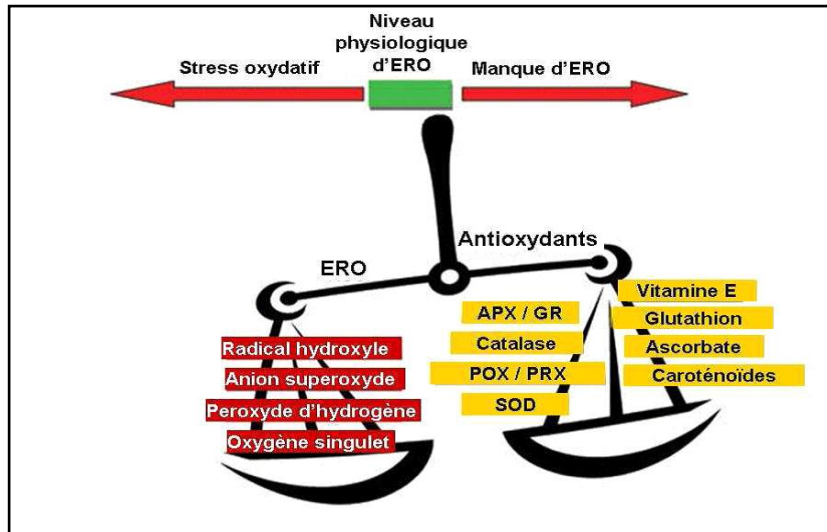
### **7.7. Effets du plomb sur le système antioxydant**

Une molécule peut être considérée comme antioxydante lorsque, étant présente en faible concentration par rapport à celle d'un substrat oxydable, retarde ou empêche significativement l'oxydation de ce substrat (Halliwell and Whiteman, 2004).

Le système antioxydant jouerait un rôle central dans la détoxification des métaux lourds ayant pénétrés dans la cellule. Il est donc important de bien comprendre d'une part les événements conduisant à un stress oxydant et d'autre part les mécanismes biochimiques impliqués dans la réponse à ce stress.

#### **7.7.1. Génération de stress oxydant**

Un des très importants effets provoqués par le plomb dans les cellules est la génération de stress oxydatif, qui est défini comme un déséquilibre entre les systèmes prooxydants et antioxydants, en faveur des premiers et source d'effets toxiques potentiels (Sies, 1991). Les Espèces Réactives de l'Oxygène (ERO), normalement produites dans les cellules se retrouvent en excès. (Figure.10).



**Figure.10 : Schématisation de la balance entre les ERO et les antioxydants.**

Les effets du stress oxydatif sont multiples et concernent d'importantes cibles moléculaires telles que les acides nucléiques, les protéines et les lipides. Le principal agent responsable de ces effets délétères est le radical hydroxyle.

Les protéines sont facilement attaquées par les ERO, soit directement, soit indirectement *via* la peroxydation lipidique. L'oxydation des acides aminés peut dans le cas de la cystéine, conduire à la formation de ponts disulfures intra- ou intermoléculaires. Ces modifications structurales peuvent altérer les fonctions des protéines: inhibition ou stimulation d'activités enzymatiques, altération des mécanismes de transduction des signaux, *etc.* (Klaunig *et al.*, 1998). La peroxydation lipidique concerne les acides gras polyinsaturés, particulièrement nombreux dans les membranes biologiques. Elle peut être d'origine enzymatique ou non enzymatique. Les métaux lourds induisent l'accumulation des ERO, le rôle des métaux lourds dans la formation des (ERO) est lié à leur capacité à exister sous différents états d'oxydation. En effet, les cations d'éléments comme Fe, Cu, Cr ou Mn sont capables de céder un ou plusieurs électrons susceptibles de réduire l'oxygène et ses dérivés. La plus connue de ces réactions est la réaction de **Fenton (1)** qui se produit en présence de fer ferreux et qui conduit à la réduction du peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) en radical hydroxyle ( $\cdot OH$ ) et en anion hydroxyle ( $OH^-$ ):



Les radicaux libres sont des espèces chimiques qui possèdent un électron célibataire qui, parce qu'il n'est pas apparié à un autre électron de spin opposé, confère à la molécule une très forte réactivité. Le radical hydroxyle  $\cdot\text{OH}$ , produit au cours de cette réaction, est un puissant agent oxydant. D'autres réactions de ce type faisant intervenir des métaux réduits ont également été décrites, telle que la réaction d'Haber-Weiss (2) au cours de laquelle le peroxyde d'hydrogène réagit avec un radical superoxyde, comme l'anion superoxyde  $\cdot\text{O}_2^-$ , aboutissant, là encore, à la production du radical hydroxyle.



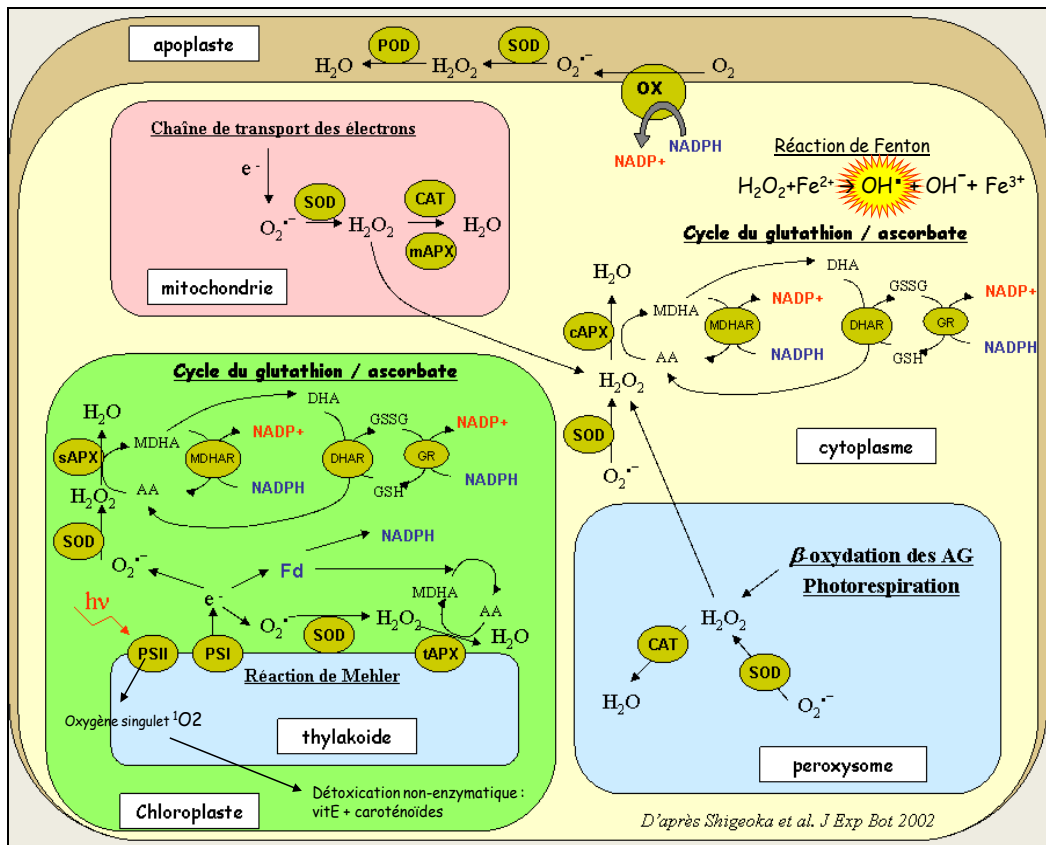
Par ailleurs, même des métaux qui n'existent que sous un seul état d'oxydation, tels que le cadmium et le nickel par exemple, peuvent induire une accumulation d'ERO pour trois raisons : une perturbation de certaines voies métaboliques, une inactivation et un «down régulation» des enzymes du système antioxydant ou un épuisement du stock de molécules de faible masse moléculaire comme l'ascorbate, le glutathion, la vitamine E ou les caroténoïdes, qui présentent des capacités antioxydantes (Santa Di Topi *et* Gabbrielli., 1999).

Ces espèces réactives de l'oxygène incluent l'anion super oxyde ( $\text{O}_2^-$ ), le radical hydroxyle ( $\text{OH}\cdot$ ) ou encore le peroxyde d'hydrogène. Le stress oxydant entraîne un ralentissement de la croissance végétale, mais également des dommages moléculaires en interagissant avec des substrats biologiques (dénaturation de protéines, inactivation d'enzymes, des cassures au niveau de l'ADN...). Les travaux de Pourrut *et al.*, (2008) démontrent une induction d'espèces réactives de l'oxygène dose dépendante dans des racines de fèves exposées à une solution plombée contenant  $1 \text{ mg.Kg}^{-1}$  de plomb sous forme  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ . La première étape de l'induction de stress oxydant peut être générée par l'inactivation de certaines enzymes, par fixation sur leur groupement  $-\text{SH}$  ou par déplacement d'ions métallique essentiels à l'enzyme.

Pour combattre ces ERO, les cellules végétales disposent de deux grands types de défense :

- **Un système enzymatique**, visant à détruire les ERO:

- Les superoxydes dismutases (SOD) qui peuvent éliminer l'anion superoxyde par dismutation, pour former de l'oxygène et de l'eau.
- Les catalases, qui détruisent, le peroxyde d'hydrogène, en aboutissant également à la formation d'oxygène et d'eau.
- Les peroxydases, détruisant également le peroxyde d'hydrogène en formant de l'eau (Figure.11).



**Figure.11: Différentes voies métaboliques d'élimination des ERO dans les végétaux.**

**Compartiment rose:** dans la mitochondrie, dans la chaîne de transport des électrons (TCE) **compartiment jaune:** dans le cytosol, cycle du Glutathion-Ascorbate; **compartiment bleue:** dans les peroxysomes dans les réactions de la  $\beta$  oxydation des AG et photorespiration et enfin le compartiment vert, dans les chloroplastes par le biais des réactions du cycle Glutathion-Ascorbate et de la chaîne photosynthétique de transport des électrons (PSI et PSII).

**-Un système non enzymatique, avec des macromolécules capables de piéger ces ERO**

- Le glutathion (GSH) est le plus abondant chez les êtres vivants.
- L'acide ascorbique
- Les tocophérols
- Les caroténoïdes

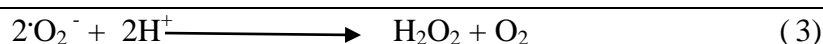
### 7.7.2. Les principaux systèmes enzymatiques

Le système antioxydant contrôle la production d'ERO. Trois activités enzymatiques clefs occupent une place centrale dans les mécanismes de détoxication de ces ERO: il s'agit des superoxydes dismutases (SOD), des catalases (CAT) et des peroxydases (POX). Ces enzymes ont une action complémentaire sur la cascade radicalaire au niveau de l'anion

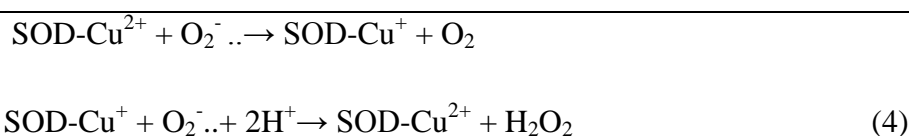
superoxyde  $O_2^-$  et du peroxyde d'hydrogène, conduisant finalement à la formation d'eau et d'oxygène moléculaire.

### 7.7.2.1. Les superoxyde-dismutases, (SODs)

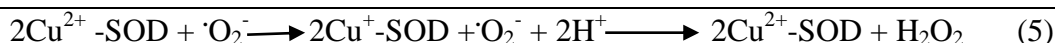
Elles sont responsables de la dismutation de l'anion superoxyde en peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ), selon la réaction (3) :



Il existe trois types de SOD: une SOD contenant du manganèse, présente dans la matrice mitochondriale des eucaryotes et chez certaines bactéries, une SOD à fer présente dans le périplasma des bactéries anaérobies facultatives et une SOD contenant du cuivre et du zinc, présente dans le cytosol des cellules eucaryotes (Sies et Cadenas, 1983; Pelmont, 1995). La SOD catalyse la dismutation de l'anion superoxyde en oxygène moléculaire et peroxyde d'hydrogène à une vitesse largement supérieure à celle de la dismutation spontanée, selon la réaction (exemple de la SOD à cuivre et à zinc):



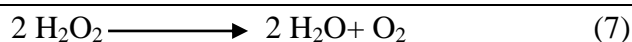
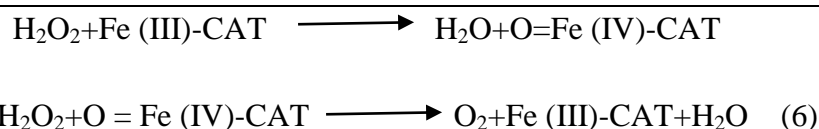
Ces enzymes existent sous différents isoformes, dont la structure d'ensemble est très bien conservée au cours de l'évolution: le repliement tridimensionnel forme un puit hydrophobe au centre de la protéine, dans lequel se glisse l'anion superoxyde. Le mécanisme réactionnel est catalysé par un métal divalent situé au cœur de l'enzyme. Selon la nature de ce métal on distingue les superoxyde- dismutases à manganèse (Mn-SOD), cytosolique et enfin, les superoxyde-dismutases à fer ferreux (Fe-SOD), localisées dans le chloroplaste. L'équation (4) décrit la chaîne catalytique typique avec le cuivre:



### 7.7.2.2. Les catalases (CATs)

Les catalases (CATs) (EC1.11.1.6) sont des enzymes majoritairement peroxysomales catalysant la dismutation du peroxyde d'hydrogène (Arora *et al.*, 2002). Ces derniers contiennent également des oxydases, génératrices de peroxyde d'hydrogène. Ces enzymes sont présentes chez tous les organismes aérobies. La plupart des CAT sont formées de quatre

sous-unités identiques de chaînes polypeptidiques d'environ 500 acides aminés contenant chacune un ion  $\text{Fe}^{3+}$  situé dans un noyau hémique. Pour catalyser la réaction, l'atome de fer réalise une coupure hétérolytique de la liaison O-O du peroxyde d'hydrogène, créant de ce fait une molécule d'eau et un groupement  $\text{Fe(IV) = O}$  hautement oxydant. Ce dernier peut ensuite oxyder une autre molécule de peroxyde d'hydrogène pour donner du dioxygène et de l'eau selon la réaction suivante:



Du fait de sa localisation et de sa faible affinité pour l' $\text{H}_2\text{O}_2$  le rôle principal de la CAT est de détoxifier le peroxyde d'hydrogène produit à proximité par la chaîne de transport des électrons (CTE) chloroplastique, et surtout par les processus peroxysomaux de  $\beta$ -oxydation et de photorespiration (Smirnoff, 1998). Bien qu'elle ait été longtemps considérée comme une des enzymes antioxydantes les plus importantes, il semble désormais que son importance dans la détoxification de l' $\text{H}_2\text{O}_2$  soit réduite, en dehors de celui issu du métabolisme peroxysomal (Halliwell, 2006; Pitzschke *et al.*, 2006). La CAT ne serait qu'un «dévoloir» permettant de limiter les productions excessives d'ERO (Willekens *et al.*, 1997). Cependant, cette vision pourrait être en partie erronée, puisque, bien que les résultats soient souvent contradictoires dans la littérature, l'activité catalasique est souvent affectée négativement lors de stress.

### 7.7.2.3. Les peroxydases (POD, POX)

Les POX (EC 1.11.1.x) sont une large famille multi génique d'enzymes hémiques catalysant la réduction d'un substrat oxydé en utilisant de nombreux co-substrats comme donneurs d'électrons. Pour la majorité de ces enzymes, le substrat optimal est le peroxyde d'hydrogène. Les POX, permettent, comme les catalases, la réduction de  $\text{H}_2\text{O}_2$  en eau et en oxygène moléculaire. Cependant, à la différence des catalases, les POX nécessitent la présence d'un substrat particulier pour réaliser leurs activités. Chez les végétaux deux types principaux de «molécules anti- oxydantes» sont utilisés comme substrat par les peroxydases:

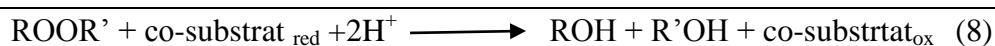
l'acide ascorbique (ASC) et le glutathion (GSH). Ces deux molécules participent au cycle "ascorbate/glutathion" (Noctor and Foyer, 1998 ; Foyer and Noctor, 2000). Cette étape est catalysée par l'ascorbate peroxydase (APX) et le gaïacol peroxydase (GPX) rencontrés au niveau des chloroplastes, du cytosol, des mitochondries et des peroxysomes.

#### 7.7.2.3.1. Ascorbate peroxydase (APX)

Le peroxyde d'hydrogène (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) est supprimé par l'enzyme ascorbate peroxydase (APX) et l'ascorbate est régénéré par le cycle (Glutathion/ascorbate) qui met en jeu la monodéhydroascorbate réductase (MDAR), la déhydroascorbate réductase (DHAR) et le glutathion réductase (Inzé et Van Montagu, 1995 ; Foyer *et* Noctor, 2003; Paradiso *et al.*, 2008. Pour permettre cette réaction, l'ascorbate oxydé doit être à nouveau réduit. Pour cela, deux voies (directes et indirectes) de régénération de l'ascorbate coexistent: la réduction d'une molécule de NAD (P) H. Cependant, le MDHA est une molécule relativement instable qui a tendance à se dismuter spontanément en déhydroascorbate (DHA) et ascorbate. La seconde voie de régénération de l'ascorbate consiste donc en une réduction du DHA par la déhydroascorbate réductase (DHAR), couplée à une oxydation du GSH. Enfin, le glutathion oxydé, produit au cours de cette dernière réaction, est régénéré en GSH grâce la glutathion réductase (GR).

#### 7.7.2.3.2. Le gaïacol peroxydase (GPX)

Le gaïacol peroxydase (GPX) oxyde le gaïacol (O-methoxyphénol) et on le trouve essentiellement au niveau du cytosol, des vacuoles de l'apoplasme ou de la paroi cellulaire. Cette enzyme serait également impliquée dans différents phénomènes liés à la croissance végétale tels que, l'élongation et la différenciation cellulaire (De Marco *et al.*, 1999; Liskay *et al.*, 2004). Les POX peuvent facilement aussi, réduire des hydroperoxydes organiques ou des peroxydes lipidiques :



Dans certaines conditions, une partie des POX (classe I et III) peut avoir une activité similaire à la catalase (catalase-like), c'est-à-dire qu'elles possèdent la capacité de réduire l'H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en absence de co-substrat (Mika *et al.*, 2004). Au niveau cellulaire, la répartition des POX est très nette. Les POX de classe III (enzymes secrétées par les cellules végétales) se trouvent dans l'apoplaste sous forme soluble ou liées aux parois et membranes. Les POX de classe I (enzymes intracellulaires), dont l'APX est la représentante majoritaire, sont présentes

uniquement à l'intérieur des cellules. Les peroxydases et peroxyredoxines sont maintenant considérées comme les enzymes clefs de la détoxification de ces ERO chez les plantes. En définitive, les composantes du système antioxydant n'agissent donc pas de manière individuelle mais sont en relation directe les uns avec les autres.

#### 7.7.2.4. Les glutathion S-transférases

Les GSTs peuvent détoxifier un large spectre de xénobiotiques initialement électrophiles ou devenus électrophiles après métabolisation. Ces composés peuvent être des herbicides ou des pesticides (thiocarbamates, organophosphorés), des amines aromatiques, des hydrocarbures aromatiques polycycliques (benzo[*a*]pyrène -B[*a*]P-), des toxines (aflatoxine B1) ou des substances pharmaceutiques (paracétamol, nitroglycérine, bromosulfophthaléine). Les GSTs possèdent un rôle capital dans les mécanismes de protection de l'organisme vis à vis des effets néfastes du stress oxydatif. Certaines GSTs peuvent en effet métaboliser les hydroperoxydes lipidiques résultant de la peroxydation lipidique. Contrairement aux glutathion peroxydases dépendantes du sélénium, ces GSTs ne possèdent pas de sélénium dans leur structure et ne métabolisent pas le peroxyde d'hydrogène. Les GSTs sont capables de lier de manière covalente ou non de nombreux composés hydrophobes qu'elles ne métabolisent pas, ceci à des fins de stockage, de séquestration ou de transport (certains xénobiotiques ou leurs métabolites).

#### 7.7.3. Les principaux systèmes non enzymatiques

Ce sont des molécules antioxydantes à faible poids moléculaire, liposolubles ou hydrosolubles. La vitamine E (alpha-tocophérol), liposoluble, est le principal composé antioxydant au sein des membranes. Elle désactive les radicaux peroxyles (ROO) formés au cours de la peroxydation lipidique, inhibant ainsi la propagation de cette dernière. Le radical tocopheryloxy en résultant est suffisamment stable pour ne pas propager la peroxydation. Il peut au contraire réagir avec un autre radical peroxy (réaction de terminaison) ou être reconverti en alpha tocophérol par d'autres molécules antioxydantes, hydrosolubles, comme la vitamine C (acide ascorbique). Cette dernière peut également se comporter comme un agent pro oxydant, en réduisant le  $Fe^{3+}$  en  $Fe^{2+}$ , membre actif de la réaction de Fenton (Kaur et Perkins, 1991). De nombreuses autres molécules antioxydantes existent telles que le bêta-carotène, le rétinol (liposolubles), l'acide urique et le glutathion réduit (hydrosoluble).

### 7.7.3.1. L'ascorbate ou vitamine C

L'acide ascorbique (ASC) est un des principaux acides faibles de la cellule végétale au pH physiologique. Il se dissocie en anion ascorbate et sera utilisé au niveau cellulaire comme un donneur d'électrons. Le premier produit de la réaction d'oxydation de l'ascorbate est le radical monodéhydroascorbate (MDHA). Du fait de son électron libre très excentré, le MDHA n'est pas très réactif avec les autres molécules biologiques (Navas *et al.*, 1994). De plus, étant relativement instable, il se transforme spontanément et rapidement en ASC et déhydroascorbate (DHA), (Heber *et al.*, 1996). Le DHA est également une molécule instable et subit rapidement une hydrolyse conduisant à la formation d'acide 2,3-dikétogulonique (DKG) (Deutsch, 2000).

L'ascorbate est présent dans tous les compartiments cellulaires, ainsi que dans la matrice extracellulaire. Contrairement aux cellules animales, la concentration en ASC est très élevée dans les cellules végétales (plusieurs millimolaires). C'est un composant incontournable chez les plantes qui interviendrait notamment dans la régulation du cycle cellulaire et dans l'extension des parois végétales (Horemans *et al.*, 2000). L'ascorbate est toutefois beaucoup plus connu pour ses propriétés antioxydantes (Chen and Gallie, 2004; Foyer and Noctor, 2005a). En effet, il réagit rapidement avec l'anion superoxyde et l'oxygène singulet, ou encore avec le peroxyde d'hydrogène, mais cette dernière réaction est catalysée par l'ascorbate peroxydase (APX). L'ascorbate est indispensable par sa capacité à réduire d'autres antioxydants oxydés comme la vitamine E ou les caroténoïdes (Asada, 1994).

### 7.7.3.2. La vitamine E

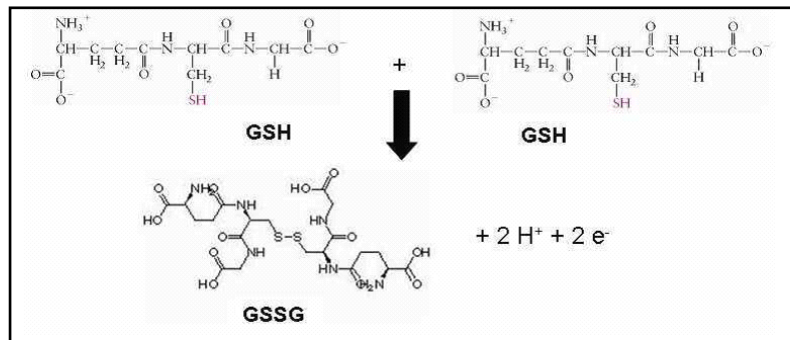
La vitamine E ou  $\alpha$  tocophérol ( $\alpha$ TOH) est l'antioxydant le plus efficace vis-à-vis des radicaux peroxydes dans les membranes phospholipidiques ( $\text{LOO}^\cdot$ ). La vitamine E élimine les radicaux peroxydes lipidiques selon la réaction suivante :



### 7.7.3.3. Le glutathion

Le glutathion est un thiol très abondant se retrouvant de façon ubiquitaire chez les animaux et les végétaux. Il possède deux formes redox distinctes. La forme réduite (GSH) est

un tripeptide ( $\gamma$ -Glu-Cys-Gly), stable, à fort pouvoir réducteur et très soluble dans l'eau. Toutes ces caractéristiques en font un donneur exceptionnel d'électrons adéquat dans les réactions physiologiques. L'oxydation du glutathion entraîne la formation d'un pont disulfure entre les cystéines de deux GSH. Cette forme oxydée du glutathion est appelée GSSG (Figure.12). En conditions non stressantes, les cellules maintiennent un ratio GSH/GSSG très important, supérieur à 100 dans le cytosol et la mitochondrie (May *et al.*, 1998 ; Noctor *et al.*, 1998).

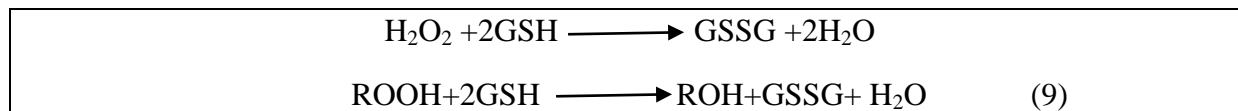


**Figure.12 : Oxydation de deux molécules de GSH conduisant à l'établissement d'un pont Disulfure et la formation de GSSG.**

La concentration en GSH est très importante dans les cellules végétales, et en particulier dans les chloroplastes où elle peut atteindre 5mM (Noctor *et al.*, 1998).Le glutathion joue de nombreux rôles physiologique chez les végétaux (May *et al.*, 1998; Noctor *et al.*, 1998). Il représente une forme importante de stockage de sulfure réduit, et participe à l'allocation en sulfure des différents compartiments cellulaires et des différents organes (Herschbach and Rennenberg, 1991; Lappartient and Touraine, 1996). C'est également un régulateur de l'expression génique (Baier and Dietz, 1997) et le précurseur des phytochélatines (PC) jouant un rôle prédominant dans la séquestration des métaux chez les végétaux (Clemens, 2006a; Clemens, 2006b). Le GSH sert également de substrat pour la glutathion S-transférase (GST) qui catalyse sa conjugaison avec des xénobiotiques, participant ainsi à leur détoxication (Marrs, 1996). Il est impliqué dans la régulation redox du cycle cellulaire (Gyuris *et al.*, 1993; Noctor *et al.*, 1998).

Du fait de sa forte concentration dans les tissus végétaux et de son fort pouvoir réducteur, le GSH participe au statut redox cellulaire en jouant le rôle de tampon redox dans les cellules (Foyer and Noctor, 2005a; Noctor, 2006b). La synthèse de GSH est stimulée lors des différentes situations de stress et son accumulation est souvent concomitante avec celle

des ERO (Noctor *et al.*, 1998; Potters *et al.*, 2002). Le GSH peut directement réduire l' $\text{H}_2\text{O}_2$  mais également d'autres ERO, des hydroperoxydes organiques et des peroxydes lipidiques:



Un autre rôle important du GSH dans la régulation des ERO est son implication dans la régénération de l'ascorbate via le cycle enzymatique dit ascorbate/glutathion ou Asada-Halliwell-Foyer.

#### 7.7.3.4. Les caroténoïdes

Les caroténoïdes sont des pigments végétaux lipophiles formant une famille de plus de 600 molécules. Ils jouent le rôle de pigments accessoires de l'antenne collectrice des photosystèmes. En dehors de cette implication dans le processus photosynthétique, les caroténoïdes associés au PSII ou à l'antenne collectrice, participent à la protection de l'appareil photosynthétique contre les ERO (Asada, 1994 ; Miller *et al.*, 1996). En effet, ces pigments possèdent la capacité de capter l'énergie de la chlorophylle triplet ou de l'oxygène singulet (Telfer *et al.*, 1994 ; Mozzo *et al.*, 2008), ce qui les convertit en état triplet. La capacité de transfert d'énergie des caroténoïdes vers le dioxygène étant faible, ces pigments retrouvent leurs états initiaux en perdant leurs énergies sous forme de chaleur. Le mécanisme captage d'énergie/perte d'énergie par chaleur peut également directement s'effectuer à partir de la chlorophylle singulet (Demmig-Adams and Adams, 1996).

### 8. Effets toxiques chez l'homme

Le plomb peut être nocif pour les personnes de tout âge. Des études scientifiques récentes sur le plomb ont montré que les effets négatifs sur la santé se produisent à des niveaux d'exposition plus faibles qu'on ne le pensait autrefois. L'exposition à de faibles doses peut entraîner des effets subtils sur le développement intellectuel et le comportement des nourrissons et des enfants. Ceux-ci sont plus vulnérables aux effets nocifs du plomb car, comme ils sont en pleine croissance, leur corps absorbe plus facilement le plomb et l'évacue moins efficacement que celui d'un adulte. De plus, les nourrissons et les jeunes enfants risquent davantage d'ingérer du plomb parce qu'ils ont tendance à porter des choses à leur bouche. Quant aux adultes, les observations scientifiques les plus probantes jusqu'à maintenant donnent à entendre qu'une exposition à de faibles concentrations de plomb peut provoquer une faible augmentation de la tension artérielle.

Une exposition continue, même à de faibles doses de plomb, peut entraîner des effets néfastes dans l'organisme. Une fois que le plomb est absorbé dans le sang, il est éliminé de l'organisme par les urines ou il s'accumule dans les os. Le plomb peut rester dans l'organisme pendant plus de 30 ans. En général, le plomb dans le corps humain se répartit comme suit:

- 1 à 2% dans le sang
- 5 à 10% dans les tissus mous (rein, foie, rate)
- Plus de 90% est fixé sur les os

L'élimination du plomb se fait majoritairement par les urines, puis par les fèces, la salive et la sueur, et enfin par les ongles et les cheveux.

La législation du travail et la surveillance des populations exposées a considérablement réduit l'incidence du saturnisme professionnel. De rares cas sont mentionnés chez les peintres, plombiers et travailleurs sur batteries d'automobile. Le saturnisme non professionnel a comme source l'usage d'eau circulant dans de vieilles canalisations ou l'emploi de récipient encore recouverts de Pb, ou bien un environnement pollué dans des zones défavorisées (Fels *et al.*, 1998; Lin *et al.*, 1999). Dans certains pays comme la France, des normes existent afin de limiter les cas d'intoxication. La quantité de Pb dans les eaux de consommation ne doit pas dépasser  $10\mu\text{g.l}^{-1}$  (Décret n° 2001-1220), dans l'air la limite est de  $0.5\mu\text{g.m}^{-3}$  en concentration moyenne annuelle mais avec un objectif de  $0.25\mu\text{g.m}^{-3}$  (Décret n°2002-213). La norme «sol» n'est pas clairement définie: elle correspond à l'arrêté ministériel du 8 janvier 1998 pris pour le contrôle de l'épandage des boues de station d'épuration ou des boues de curage. Elle est de 100 mg de Pb par Kg de terre.

## CHAPITRE III : MATERIEL ET METHODES

### 1. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé est constitué de deux variétés de blé dur *Triticum durum* Desf.cv **Gta** dur et **Vitron** provenant de l'OAIC (Office Algérien Interprofessionnel des Céréales) d'El Hadjar, Algérie. Les principales caractéristiques de ces variétés sont reportées dans le tableau 14 ci-dessous :

**Tableau.14: Principales caractéristiques agronomiques des variétés Gta et Vitron (Catalogue ITGC, 2004)**

Génotype	Gta	Vitron
Origine	CIMMYT, sélection ITGC	CIMMYT, sélection ITGC/Tiaret
<b>Caractéristiques morphologiques</b>		
<b>Grains</b>		
1. forme des grains	Allongé	Demi Allongé
2. coloration du phénol	Moyenne	Faible
3. longueur des poils de la brosse	Courte	Moyenne
<b>Epis</b>		
1. couleur	Blanc	Blanc
2. compacité	Moyenne	Moyenne
3. longueur à l'exclusion des barbes	Moyenne	Moyenne
<b>Caractéristiques Culturelles</b>		
Port de tallage :	Demi dressé	Demi dressé à Demi étalé
Productivité :	Bonne	Bonne
Préparation :	Littoral, centre et est.	Littoral, centre et est.
Pluviométrie et altitude :	Pluviométrie entre 450 et 600 mm	Pluviométrie > 500mm
<b>Autres caractéristiques</b>	C'est une variété à PMG moyen, très fortement mitaine, très peu moucheté possède un petit calibre assez développé 17.1 %	C'est une variété à grain 71.93 % et a PMG moyen 47.16 % peu moucheté très mitaines.

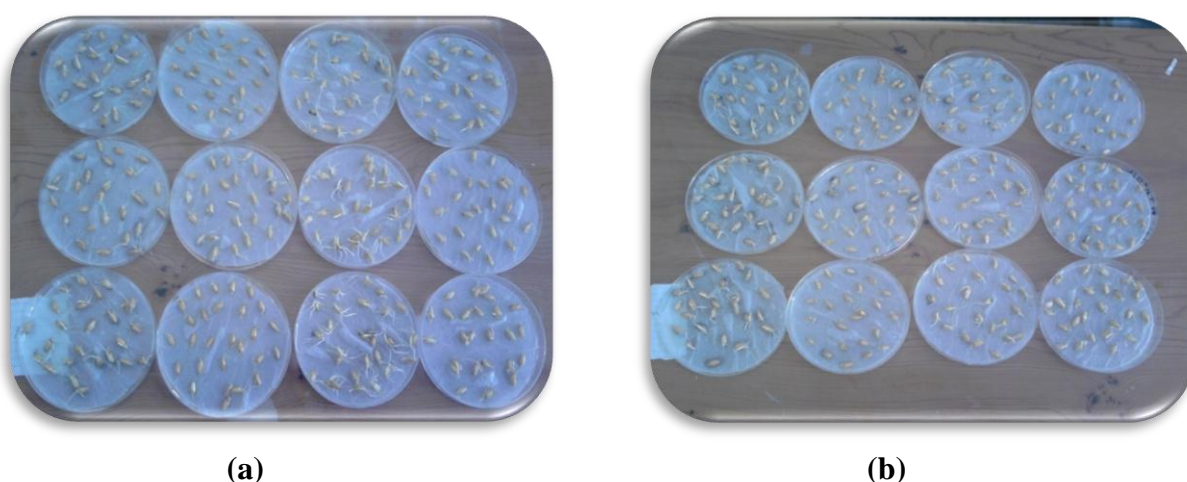
## 2. Essai de germination

### 2.1. Préparation des solutions plombière

Les solutions plombières nécessaires à cette étude ont été préparées par solubilisation d'un sel, le nitrate de plomb ( $\text{PbNO}_3$ )<sub>2</sub> dans de l'eau distillée. Les solutions préparées sont : 0, 0,32 ; 0,43 et 0,64 g.l<sup>-1</sup> équivalentes à (0, 1, 1,3 et 2mM). Le traitement des graines a été effectué par imbibition.

### 2.2. Protocole expérimental

Vingt-cinq (25) graines par variété sont mises à germer dans des boîtes de pétri de 8,5 cm de diamètre sur du papier buvard après pré-imbibition de 24 heures pour faciliter la germination. Avant leur utilisation les graines ont été lavées avec une solution d'hypochlorite de sodium à 3% pour les désinfecter pendant 15 minutes et rincées plusieurs fois à l'eau distillée. L'essai s'est déroulé selon un dispositif complètement randomisé à 4 répétitions. Les conditions d'expérimentation sont une température moyenne ambiante de 22°C, un taux d'humidité de 32% et une photopériode lumière/obscurité de 16/08 heures. Le traitement par les solutions plombifères préalablement préparées a été fait à raison de 15 ml par boîte de pétri. La germination est comptabilisée toutes les 24 heures et les graines sont considérées comme ayant germé lorsque la taille de la gemmule a atteint 1cm (Figure 13).



**Figure.13 : dispositif expérimental de l'essai de germination (a) Vitron, (b) Gta**

## 2.3. Variables étudiées

### 2.3.1. Paramètres germinatifs

Les paramètres germinatifs étudiés sont :

- le taux de germination qui est le nombre de graines germées sur le nombre total de graines mises à germer, il est exprimé en (%) et calculé selon la formule (Shirefaw et Baker, 1996)

$$TG \text{ en } (\%) = \frac{NGG}{NTG} \times 100 \quad (1)$$

Où :

NGG : nombre de graines germées

NTG : nombre total de graines mises à germer

- la mesure de la longueur des coléoptiles, des radicules et les comptages du nombre de radicules sont effectués au 8<sup>ème</sup> jour de l'expérimentation sur un sous échantillon de 30 graines germées..

### 2.3.2. Paramètres biochimiques

#### 2.3.2.1. Dosage des pigments

L'extraction des pigments photorécepteurs est réalisée par la méthode de Hiscox et Israelsam, (1979) qui utilise le diméthylsulfoxyde (DMSO) comme solvant. La chlorophylle et les pigments caroténoïdes sont déterminés par la lecture de leur absorbance sur les longueurs d'ondes comprises entre 400 à 700 nanomètres. La lecture des densités optiques (DO.) de l'extrait à 645, 663 et 640 nm puis la résolution de ce système d'équations nous donne les teneurs en chlorophylles (a) et (b) et en caroténoïdes en  $\mu\text{g.g}^{-1}$  de MF. Les équations qui nous permettent de calculer les valeurs des chlorophylles (Arnon, 1949) sont :

$$\text{Chlorophylle (a)} = 12,70 \cdot \text{DO}_{663} - 2,69 \cdot \text{DO}_{645} \quad (2)$$

$$\text{Chlorophylle (b)} = 22,90 \cdot \text{DO}_{645} - 4,60 \cdot \text{DO}_{663} \quad (3)$$

$$\text{Chlorophylle totale (a + b)} = 8,02 \cdot \text{DO}_{663} + 20,20 \cdot \text{DO}_{645} \quad (4)$$

La teneur des caroténoïdes est déterminée comme suit:

$$5(\text{DO}_{640}) - [(\text{Ca} \times 3.12) - (\text{Cb} \times 130.3)] / 200 \quad (5)$$

### 2.3.2.2. Dosage des protéines

Les protéines solubles ont été déterminées selon la méthode de Bradford (1976) qui utilise le bleu brillant de Coomassie G250 et la sérum-albumine bovine (BSA) comme standard. (0,5 g) de feuilles fraîches prélevées des jeunes plantules issues de la germination des graines, sont broyées dans 1 ml de solution tampon phosphate (pH 7.0). L'homogénat est ensuite centrifugé pendant 10 min à une vitesse de 5000 t.min<sup>-1</sup>. 0,5 ml d'acide trichloracétique (TCA) à 3% est ajouté et une 2<sup>ème</sup> centrifugation est faite à 8000 t.min<sup>-1</sup> pendant 15 min. Les culots sont dissouts dans 1 ml de NaOH 0,1 N et 5 ml de réactif de Bradford. L'absorbance est lue au spectrophotomètre à 585 nm.

### 2.3.2.3. Dosage des sucres solubles

Les sucres solubles sont déterminés par la méthode de Shields et Burnett, (1960). Les feuilles fraîches (1g) sont placées dans 3 ml d'éthanol à 80 % et laissées pendant 48 heures; le mélange est ensuite placé dans le rotavapor pendant 30 min pour évaporer l'alcool, puis on ajoute 20 ml d'eau distillée. Par la suite, 2 ml de chaque solution sont versés dans des tubes à essai avec 4 ml du réactif à l'antrone. Les tubes sont placés dans un bain marie à 90°C pendant 8 min, ensuite ils sont placés à nouveau dans un bain de glace pendant 30 min pour arrêter la réaction. La lecture des densités optiques est faite à 585 nm.

### 2.3.2.4. Dosage de l'acide aminé proline

Le dosage de la proline a été effectué selon la technique décrite par Bates et *al.*, (1973). (0,5 g) de tissus frais de plante sont placés dans une solution aqueuse d'acide sulfosalicylique à 3% (eau/vol) puis centrifugés à 5000 t.min<sup>-1</sup>. Un échantillon du surnageant contenant la proline est estimé par le réactif à la ninhydrine. L'absorbance de la fraction séparée par le toluène de la phase aqueuse est lue au spectrophotomètre à 520 nm. Le contenu en proline est exprimé en µg.g<sup>-1</sup> de matière fraîche (MF).

### 2.3.2.5. Dosage de glutathion (GSH)

Le dosage de glutathion a été réalisé selon la méthode de Weckbeker et Cory (1998). Le principe de ce dosage repose sur la mesure de l'absorbance optique de l'acide 2-nitro-5-mercaptopurique. Ce dernier résulte de la réduction de l'acide 5,5-bis-2-nitrobenzoïque (réactif d'Ellman, DTNB) par les groupements (-SH) du glutathion. Pour cela une déprotéinisation de l'homogénat (le surnageant) est indispensable afin de garder uniquement les groupements thiol spécifiques du glutathion.

**L'extraction :** 500 mg de la matière fraîche (MF) sont broyé à froid (4°C) dans 4 ml solution tampon K-potassique (pH= 6,5). Après une centrifugation 5000/min pendant (15 min) le surnageant est recueilli par filtration pour obtenir un homogénat contenant l'extrait enzymatique. Avant le dosage, une réaction de déprotéinisation a été faite sur les échantillons par le rajout de 0,2 ml d'une solution d'acide sulfosalicylique (SSA) 0,25% à 0,8 ml de surnageant. Après agitation le mélange est laissé pendant 15 min dans un bain de glace ensuite on procédé à une autre centrifugation à 10 000 tours /min pendant 5 min.

**Le dosage:** le milieu réactionnel est constitué de 0,5 ml du surnagent (extrait enzymatique) 1 ml du tampon Tris-EDTA (0,02 M d'EDTA) et 0,25 ml de DTNB. Le tout est vortéxé et laissé pendant 5 min à température ambiante pour la stabilisation de la couleur qui se développe instantanément.

La teneur en glutathion est déterminée par la lecture des (DO) à 412. L'étalonnage du spectrophotomètre se fait par une solution renfermant : 0,5 ml d'eau distillé, 1 ml Tris-EDTA et 0,25 ml DTNB. La concentration du glutathion est obtenue selon la formule suivante :

:	$\text{GSH} = \frac{\text{DO} \times 1 \times 1,525}{13,1 \times 0,8 \times 0,5 \text{ mg protéines}}$	(6)
---	--	-----

Où :

GSH: concentration en glutathion en nM.mg<sup>-1</sup> de protéines

DO: densité optique à 412 nm.

1 : volume total des solutions utilisées dans la déprotéinisation (0,8 ml surnagent + 0,2 ml SSA).

1,525 : volume total des solutions utilisées dans le dosage du GSH (0,5 ml surnagent +1 ml Tris EDTA+0,25 ml DTNB).

13,100: coefficient d'absorbance du groupement (-SH) à 412 nm.

0,5: volume du surnagent trouvé dans 1,525 ml.

0,8: volume du l'homogénat trouvé dans 1 ml.

On note que la concentration du GSH est mesurée par apport à 1 mg de protéines. C'est pour cela ce dosage doit être accompagné par le dosage des protéines

### 2.3.3. Paramètres enzymatiques

#### 2.3.3.1. Détermination de l'activité des hydrolases

##### 2.3.3.1.1. Détermination de l'activité des amylases

Les activités des enzymes étudiées sont déterminées le 4<sup>e</sup> jour de la germination. (5g) de graines de blé sont broyées dans un mortier avec 50 ml d'eau distillée et 5 ml de tampon phosphate (pH 7,5). L'homogénat est filtré puis centrifugé à 4°C à une vitesse de 12 000 t.min<sup>-1</sup> pendant 20 minutes. Le surnageant est utilisé comme filtrat contenant les enzymes. L'activité amylasique est déterminée par la méthode titrimétrique. Dans deux erlenmeyers de 100 ml, sont introduit 5 ml de l'extrait enzymatique et placés dans un bain-marie à 70°C pendant 15 minutes. Après un temps de refroidissement, il est ajouté 5ml de solution tampon (pH 5,6). Le témoin est traité directement en premier, en lui ajoutant 10 ml de Fehling I, 10 ml de Fehling II et 10 ml d'une solution d'amidon à 2%. Après l'avoir chauffé et porté en ébullition pendant trois minutes, il est retiré et filtré à travers un filtre en verre fritté G.4. Sur le précipité qui a été protégé de l'oxydation par l'oxygène de l'air, on verse 20 ml de sel de Mohr Fe (NH<sub>4</sub>)(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>. Le filtrat est titré par du permanganate de potassium (KMnO<sub>4</sub>) 0,1N. Pour l'essai expérimental c'est le même protocole que précédemment sauf que la température d'incubation au bain-marie est de 40°C pour ne pas dénaturer les enzymes. L'activité amylasique est exprimée en mg de maltose.g<sup>-1</sup> de produit obtenu après l'action des enzymes contenues dans 1g de produit selon la formule :

$$A\alpha = (a - b) \cdot F \cdot 6 \cdot 10 / C \quad (7)$$

$$A (\alpha + \beta) = (d - f) \cdot F \cdot 6 \cdot 500 / C \quad (8)$$

Où :

$A\alpha$  : activité de l' $\alpha$ -amylase (mg de maltose par g de produit).

$A (\alpha + \beta)$  : activité de la somme ( $\alpha + \beta$ ) amylase (mg de maltose par g de produit).

a et d : volumes de KMnO<sub>4</sub> 0,1 N ayant servis pour titrer les essais expérimentaux (ml).

b et f : volumes de KMnO<sub>4</sub> 0,1 N ayant servis pour titrer les essais témoins (ml).

F : Facteur de la solution de KMnO<sub>4</sub> 0,1 N.

C : Masse du produit (g).

10 et 500 - Coefficients de dilutions.

L'activité de la  $\beta$ -amylase est calculée de la manière suivante :

$$A_{\beta} = A(\alpha + \beta) - A_{\alpha} \quad (9)$$

### 2.3.3.1.2. Détermination de l'activité de la lipase

L'activité lipolytique est déterminée par la méthode titrimétrique de Luskanov (1994). (1g) de blé lyophilisé et broyé finement est placé dans une éprouvette graduée. Le volume est porté à 20 ml avec une solution tampon citrate (pH 8,0) comprenant du  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0,2M et de l'acide citrique 0,1M. Dans un erlenmeyer de 100 ml on a introduit 2 ml d'huile d'olive et 4 ml de la solution d'enzymes est placée dans un bain-marie réglé à 37°C pendant une heure. Il est agité périodiquement, toutes les 10 minutes. A la fin du temps de réaction et après addition de 15 ml d'éthanol à 96°, 5 ml d'éther et 2 ml de la solution tampon. L'activité lipasique est mesurée par titration des acides gras libres avec une solution de soude NaOH 0,1N en présence de phénolphtaléine. Parallèlement un témoin est traité dans les mêmes conditions après avoir ajouté au substrat 15 ml d'éthanol à 96° puis 5 ml de la solution d'enzyme. L'activité lipasique est exprimée en Unités Internationales (U.I) pour 1g de préparation d'enzyme ( $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ ). Une unité enzymatique ou lipasique correspond à la libération d'une  $\mu\text{mole}$  d'acide gras par minute ( $\mu\text{mole AG} \cdot \text{min}^{-1}$ ). La relation considérée est :

$$A_L = (a - b) \cdot F \cdot N \cdot 1000 \cdot 4 / t \cdot C \quad (10)$$

Où

$A_L$  : activité lipasique ( $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ )

a : volume de NaOH 0,1 N nécessaire pour titrer l'essai expérimental (ml)

b : volume de NaOH 0,1 N nécessaire pour titrer l'essai témoin (ml)

C : produit du quel est isolé la lipase (g)

t : durée de l'action de l'enzyme (h)

N : normalité de la solution de NaOH

### 2.3.3.2. Détermination de l'activité des enzymes du stress oxydant

#### 2.3.3.2.1. Préparation des extraits

Environ 500mg de matière fraîche sont broyés dans 25 ml d'une solution tampon mono potassique (pH=7). L'extrait ainsi obtenu est ensuite filtré puis centrifugé à 5 000 tours

/minute pendant 5 minutes. Le surnageant est récupéré, puis conservé à  $-4^{\circ}\text{C}$  jusqu'aux dosages. Sur chacun des extraits un dosage des protéines totales est réalisé par la méthode de Bradford (1976) en utilisant une gamme étalon de BSA.

### 2.3.3.2.2. Expression des résultats de l'activité enzymatique

En accord avec le système international, l'activité de la peroxydase et la catalase sont exprimées en  $\mu\text{Katal}$  par g de MF. Les autres activités de l'ascorbate peroxydase (APX), gaïacol peroxydase (GPX) sont exprimées en nmoles/min/mg de protéines et déterminées selon la formule (Servais, 2004) suivante :

$$\text{Act} = \frac{\Delta A \times V_t}{\epsilon \times \Delta t \times L \times V_e \times p} \quad (11)$$

Act: activité enzymatique en nmoles/min/mg de protéines

$\epsilon$ : coefficient d'extinction linéique molaire en (M)

$\Delta A$ : différence moyenne de l'absorbance

$V_t$ : volume total du mélange réactionnel en (ml)

$V_e$ : volume de l'extrait enzymatique en (ml)

L: largeur de la cuve de mesures en (cm)

P: teneur en protéines en (mg)

T: temps de lectures en (min).

### 2.3.3.2.3. Détermination de l'activité peroxydasique

La mesure de l'activité enzymatique de la peroxydase se fait par l'intermédiaire d'un donneur d'électron, ici le Gaïacol (Méthoxyl- 2-Phénol) qui s'oxyde en présence d'enzyme et d'eau oxygénée donnant une coloration orangée. L'activité est donc mesurée par la lecture de l'absorbance due à l'oxydation du Gaïacol par spectrophotométrie à 470 nm (Baaziz *et al.*, 2006). Pour ce faire, on introduit dans un tube à spectrophotométrie 1ml d'eau oxygénée ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 0,01N, 1ml de Gaïacol, et 1ml d'extrait enzymatique (dilué au  $1/10^{\text{ème}}$  au minimum), et on procède à la lecture de l'absorbance toutes les 30 secondes pendant 2 minutes. Si l'activité enzymatique est trop importante il faut alors effectuer une nouvelle dilution de l'extrait enzymatique. Nous allons mesurer l'absorbance de trois témoins ayant chacun un élément en moins avec les constitutions suivantes :

-**témoin 1 sans enzyme**: 1 ml de tampon, 1 ml d'eau oxygénée et 1 ml de gaïacol ce témoin permet de visualiser l'oxydation chimique du gaïacol,

-**témoin 2 sans eau oxygénée**: 1ml d'extrait enzymatique, 1ml de tampon et 1 ml de Gaïacol ce témoin permet de montrer l'importance du substrat,

-**témoin 3 sans gaïacol**: 1ml solution tampon ce témoin est basé sur les phénomènes d'oxydation de l'extrait.

L'activité peroxydasique est exprimée en  $\mu\text{Kat.g}^{-1}$  de MF ( $\mu\text{Kat}$  = correspond à une  $\mu\text{mole}$  de substrat par seconde). Elle est donnée par la formule ci- dessous (11) qui prend en compte le rapport de l'absorbance par unité de temps  $\Delta A/\Delta T$  mesuré avec le coefficient directeur de la droite de tendance de l'échantillon.

$$\text{POX} = \frac{4 \times \Delta A / \Delta t \times V_R \times V_D \times V_E}{\epsilon \times e \times PE_2 \times PE_1 \times MF} \quad (12)$$

$\Delta A / \Delta T$ : le rapport de l'absorbance par unité de temps

$V_R$  : volume réactionnel

$V_D$  : volume de dilution

$V_E$  : volume de l'extrait brut

$\epsilon$  : coefficient d'extinction moléculaire du gaïacol

$e$ : épaisseur du tube (cuve à spectrophotomètre)

$PE_2$ : volume d'extrait dilué

$PE_1$ : volume d'extrait brut utilisé dans la dilution

$MF$ : masse de la matière fraîche utilisée.

#### 2.3.3.2.4. Détermination de l'activité de la catalase

La catalase (CAT) catalyse la décomposition de l'eau oxygénée ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) en eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) et en oxygène moléculaire ( $\text{O}_2$ ). Pour mesurer cette activité l'extrait enzymatique est mis en contact avec de l'eau oxygénée pendant une durée déterminée. L'évaluation alors de l'activité enzymatique de la catalase est déterminée par la quantité restante d'eau oxygénée titrée par du permanganate de potassium en milieu acide (Vasile *et al.*, 2005). Le protocole consiste à mettre 1 ml d'extrait enzymatique dans 10 ml d' $\text{H}_2\text{O}_2$  à 0,01N (solution qui est

tamponnée) pendant 5min et d'arrêter la réaction en introduisant 25 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> à 2%. Le titrage est effectué pour mesurer l'H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> restant, les mesures seront faites en double et la moyenne des deux sera gardée. Deux témoins permettront d'obtenir le volume de permanganate de potassium sans réaction enzymatique, pour cela nous allons mesurer l'H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dans une solution comprenant 10 ml d'eau oxygénée à 0,01 N et 25ml d'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> à 2%.

Les dosages ainsi effectués nous donnent les valeurs de permanganate de potassium sans réaction enzymatique (témoin). En effectuant la différence entre la valeur moyenne des témoins et celle des extraits enzymatiques nous obtenons un volume de permanganate de potassium qui correspond à la quantité d'eau oxygénée disparue après l'action de la catalase. Il suffit donc de calculer l'activité enzymatique de la catalase en  $\mu\text{kat}$  par gramme de matière fraîche ( $\mu\text{Kat}$  = disparition d'une  $\mu\text{mole}$  de substrat par seconde) avec la relation suivante :

L'activité enzymatique de la catalase est exprimée en  $\mu\text{Kat.g}^{-1}$  de MF

$$\text{Cat} = \frac{n \times (V_t - V) \times V_E}{t \times P_E \times M_F} \quad (13)$$

Avec n: nombre de moles de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxydées par 1ml de KMnO<sub>4</sub>.

V<sub>t</sub>: volume moyen de permanganate de potassium pour le dosage des témoins (ml)

V: volume moyen de permanganate de potassium pour le dosage des extraits enzymatiques (ml)

V<sub>E</sub>: volume de l'extrait enzymatique brut.

P<sub>E</sub>: volume de l'extrait enzymatique qui est introduit dans la réaction mesurée.

t: temps de réaction (300 secondes).

M<sub>F</sub>: masse de matière fraîche en grammes: 0.5g.

#### 2.3.3.2.5. Détermination de l'activité de gaïacol peroxydase (GPX)

L'activité GPX peut être déterminée par spectrophotométrie à 470 nm selon la méthode de Hiner *et al.*, (2002). Pour un volume final de 3ml, le mélange réactionnel est constitué de 2.850 ml de tampon K-phosphate 50mM (pH=7), 50 $\mu\text{l}$  de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> à 0.3% et 100 $\mu\text{l}$  d'extrait enzymatique. La réaction est initiée par l'addition du H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Les calculs d'activité sont réalisés en utilisant un coefficient d'absorption molaire de 2470 M<sup>-1</sup>.cm<sup>-1</sup>.

#### 2.1.3.2.6. Détermination de l'activité ascorbate peroxydases (APX)

L'APX catalyse la peroxydation de l'ascorbate en monodéhydroascorbate (MDA). L'activité APX peut être déterminée en mesurant la diminution de la concentration en ascorbate à 290 nm au cours de la réaction (Nakano et Asada, 1981). Le volume réactionnel final de 3 ml contient : 100 µl d'extrait enzymatique, 50 µl d' $H_2O_2$  à 0,3% et 2850 µl de tampon K- phosphate (50mM, pH = 7) et 0,5mM ascorbate. La réaction est initiée par l'addition de 0.3mM de  $H_2O_2$ . La vitesse d'oxydation de l'ascorbate est déterminée en mesurant la diminution de l'absorbance à 290 nm pendant 2 min. L'étalonnage de l'appareil se fait en l'absence de l'extrait enzymatique. Les calculs d'activité sont réalisés en utilisant un coefficient d'absorption molaire de  $2.8 \text{ mM}^{-1}.\text{cm}^{-1}$ . L'activité APX est exprimée en nmol/min/mg de protéines.

#### 2.1.3.2.7. Détermination de l'activité de l'enzyme glutathion sulfotransférase (GST)

La méthode consiste à faire réagir les GSTs sur un mélange de CDNB (20mM)-GSH (100mM). La variation de la densité optique due à l'apparition du complexe CDNB-GSH est mesurée à 340 nm toutes les 20 secondes pendant 2 min (Weckebeker et Corry, 1998). 500 mg de matière fraîche des feuilles (MF) sont broyées à froid dans un mortier dans 4 ml de tampon K-phosphate (pH = 7) puis centrifugé à 9 000 tours /min pendant 30 min. Le milieu réactionnel est constitué de 3 ml: de 1ml de l'extrait enzymatique prélevé du surnageant, de 1 ml de tampon K-phosphate (pH= 7) et 1ml de CDNB (20mM) plus GSH (100mM).

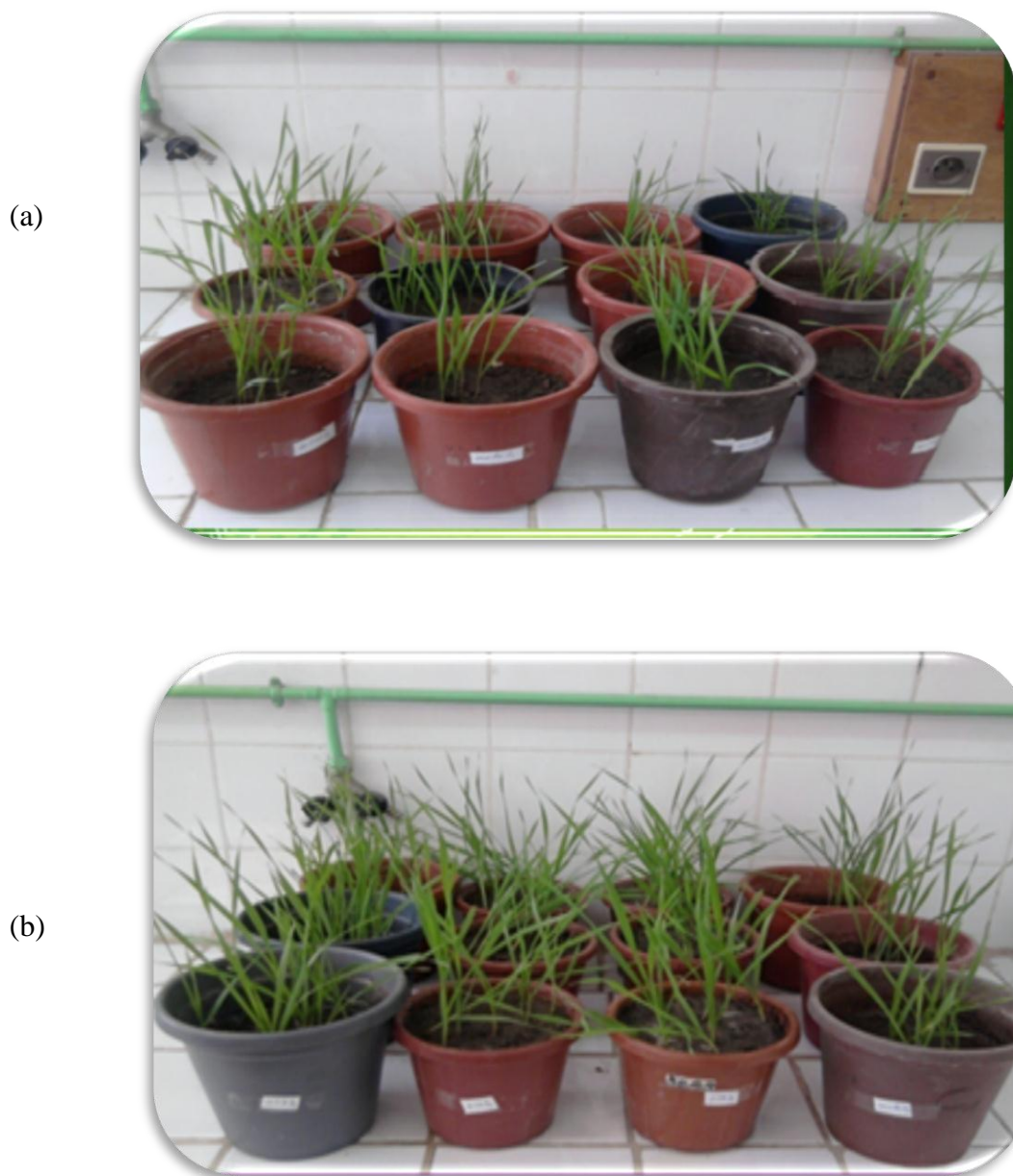
Le blanc pour calibrer l'appareil (spectrophotomètre) est constitué de 50µl de la solution tampon K-phosphate (pH=7) plus 50µl de CDNB plus 100µl de GSH.

### 3. Essai de croissance

L'essai de croissance a été réalisé au laboratoire dans des conditions semi-contrôlées. Les conditions d'expérimentation sont : une lumière continue de photopériode 16/8heures, une température moyenne journalière de 17°C et un taux d'humidité de 32%

#### 3.1. Plan de culture

Les semences des deux variétés Gta et Vitron sont mises à germer et croître dans des pots de 1 Kg de sol de texture équilibrée (sablo-argilo-limoneuse), selon un dispositif expérimental aléatoire complètement randomisé (Figure.14).



**Figure.14 : Dispositif expérimental de l'essai de croissance. (a) Vitron, (b) Gta**

Le sol utilisé pour l'essai de croissance provient de la station de développement de l'élevage bovin et des cultures fourragères de la région de Fetzara. Ses caractéristiques physico-chimiques sont reportées dans le tableau ci-dessous (Tableau.15).

**Tableau.15 : Caractéristiques physico-chimiques du sol utilisé (Boudelaa, 2007)**

	<b>Composantes du sol</b>	<b>Teneur</b>	<b>Remarques</b>
<b>Caractéristiques Physiques</b>	Sables fins	30%	Texture : sablo-argilo limoneuse Texture équilibrée
	Sables grossiers	15%	
	Argiles	17%	
	Limons fins	13%	
	Limons grossiers	25%	
<b>Caractéristiques Chimiques</b>	Azote	0.10%	De 0.1 à 0.15% Moyennement pourvu
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> assimilable	20ppm	< à 0.12% Très faible
	K <sub>2</sub> O assimilable	30ppm	< à 0.12% Très faible
	Matière organique (MO)	2.5%	Assez bonne
	Rapport C/N	14.5	14.5 > à 12 Bonne minéralisation de la MO
	Carbonates CaCO <sub>3</sub>	0	Aucune influence sur le pH
	C.E.C	10 méq/100g de terre	Faible
	Ca Mg Na K	5 méq/100g 4 méq/100g 0.3méq/100g 0.64/100g	Taux de saturation élevé. Acidité de réserve faible ; pas d'antagonisme entre les cations échangeables
pH eau pH KCl	7.3 6.8	Aucune nécessité de corriger	

. Dans chaque pot, le sol a été mélangé avec les différentes concentrations préalablement préparées (Co: témoin sans Pb, C<sub>1</sub> :150 mg.Kg<sup>-1</sup> de sol, C<sub>2</sub> : 300mg.Kg<sup>-1</sup> de sol, et C<sub>3</sub> : 500mg.Kg<sup>-1</sup> de sol). Pour les besoins de cette étude, on a utilisé 300 graines par variété à raison de 30 graines par pot et pour chaque concentration (3 répétition pour chaque concentration). L'irrigation a été apportée par simple arrosage au seuil de 2/3 de la capacité au champ. Après la levée, le nombre de plantes par pot a été réduit à 15 pour éviter le phénomène de compétition et mieux cerner l'effet du plomb sur les paramètres étudiés.

## 3.2. Paramètres étudiés

### 3.2.1. Détermination des paramètres physiologiques

#### 3.2.1.1. Surface foliaire et poids spécifique des feuilles

Un sous échantillon de 10 feuilles par variété et par traitement a été utilisé pour déterminer la surface foliaire et le poids spécifique des feuilles (1<sup>ère</sup> feuille, 2<sup>ème</sup> feuille et 3<sup>ème</sup> feuille). La surface foliaire est déterminée par la mesure de la longueur et la largeur selon la formule suivante (Spagnoletti et Qualset, 1990) :

$SF = L \times l \times 0.749$	(14)
--------------------------------	------

Où :

SF : surface foliaire en  $cm^2$

L : longueur en cm

l: largeur en cm

Les feuilles sont ensuite placées dans une étuve à 80°C pendant 48heures. Leurs pesées après ce passage constituent leurs poids secs qui va nous permettre de calculer le poids spécifique des feuilles en appliquant la formule ci-dessous (Araus *et al.*, 1998):

$PSF = PF/SF$	(15)
---------------	------

Où :

PSF : Poids Spécifique des Feuilles exprimé en ( $g.cm^{-2}$ )

PS : Poids Sec en (g)

SF : Surface Foliaire en ( $cm^2$ )

#### 3.2.1.2. Teneur relative en eau des feuilles (TRE)

Pour déterminer ce paramètre, un sous échantillon de 10 feuilles a été pris. Leur pesée directe constitue leur poids frais (PF). Ces feuilles sont ensuite placées dans des éprouvettes graduées contenant de l'eau distillée pendant 48 heures. Leur deuxième pesée, constitue leur poids de turgescence (PT). Enfin leur passage à l'étuve pendant 24 heures à 105°C permet de connaître leur poids sec (PS). Ainsi, la teneur en eau des tissus du mésophylle foliaire est déduite selon la formule suivante (Shirefaw et Baker, 1996) :

$\text{TRE} = \text{PF-PS/PT-PS} \times 100$	(16)
--	------

Où:

TRE: Teneur relative en eau des feuilles en (%).

PF: Poids Frais en (g)

PS: Poids Sec en (g)

PT: Poids de Turgescence en (g).

### **3.3.2. Dosages biochimiques**

#### **3.3.2.1. Dosage des pigments (se conférer partie germination)**

#### **3.3.2.2. Dosage des protéines (se conférer à partie germination)**

#### **3.3.2.3. Dosage du glutathion (se conférer partie germination)**

### **4. Analyses statistiques**

Tous les résultats de l'étude ont été traités par l'analyse de variance à 2 critères de classification (ANOVA.2) modèle fixe (Dagnelie, 1981) à l'aide du logiciel Mini tab version 13.31. Les données sont les valeurs moyennes (Moyenne  $\pm$  écart type) avec  $n = 3$  (3 répétitions de 25 graines pour les paramètres germinatifs et 3 répétitions pour les dosages biochimiques et enzymatiques). Pour l'essai de croissance en pot et sur le substrat sol, c'est le même type d'analyse qui a été effectué.

## CHAPITRE. IV: RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 1. Résultats de la germination

#### 1.1. La faculté germinative

L'effet du plomb sur la germination des deux variétés de blé (Gta dur et Vitron) a été mis en évidence. Les résultats obtenus (**Figure.16**) montrent que dans les lots témoins, les graines sont viables. En effet, dès le 5<sup>ème</sup> jour, toutes les semences présentaient un maximum de germination (> à 95 %). Cependant, l'action du plomb sur le pouvoir germinatif, montre que celui-ci exerce un effet négatif et significatif ( $P < 0,001$ ) (**Tableau.16**). Une absence totale de germination est notée chez toutes les graines traitées avec la concentration la plus forte (2 mM). Le traitement des graines par l'autre concentration (1,3mM) a fait chuter le taux de germination de 99% à respectivement 30% et 20% pour les variétés Gta dur et Vitron.

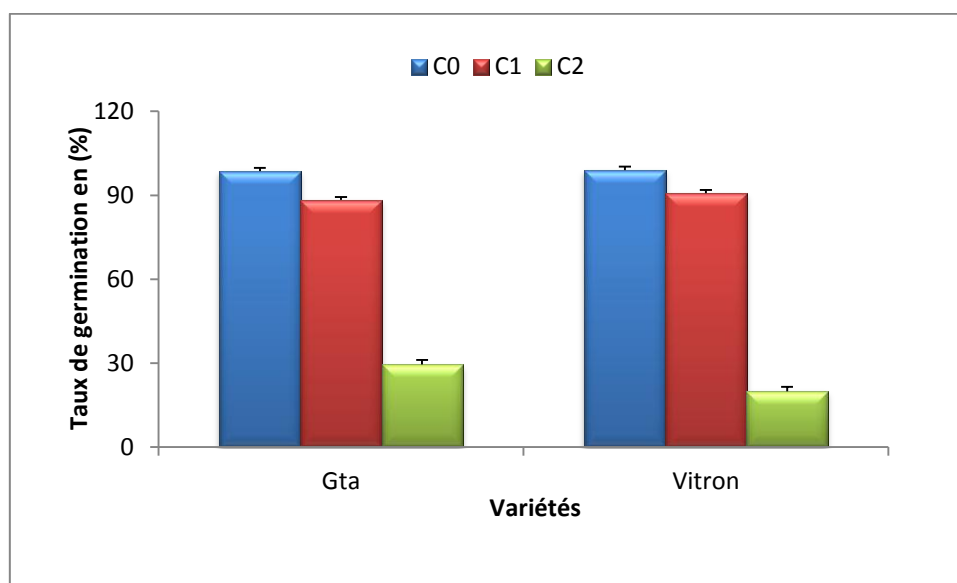


Figure 16 : Effets du plomb sur le taux de germination des graines de blé mises à germer dans des solutions contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb. C<sub>0</sub> : 0g.L<sup>-1</sup> témoin, sans traitement, C<sub>1</sub>: 0,32g.L<sup>-1</sup>, C<sub>2</sub>: 0,43g.L<sup>-1</sup>, durant 8jours.

#### 1.2. Allongement des coléoptiles et nombre racinaire

Les résultats obtenus (**Figures 17, 18**) montrent, chez les jeunes plantules issues de graines traitées, un ralentissement de la croissance en longueur des coléoptiles et une

diminution du nombre de radicelles. L'effet est proportionnel à la dose du polluant appliquée. Les différences sont hautement significatives ( $P < 0,001$ ), (Tableau 16).

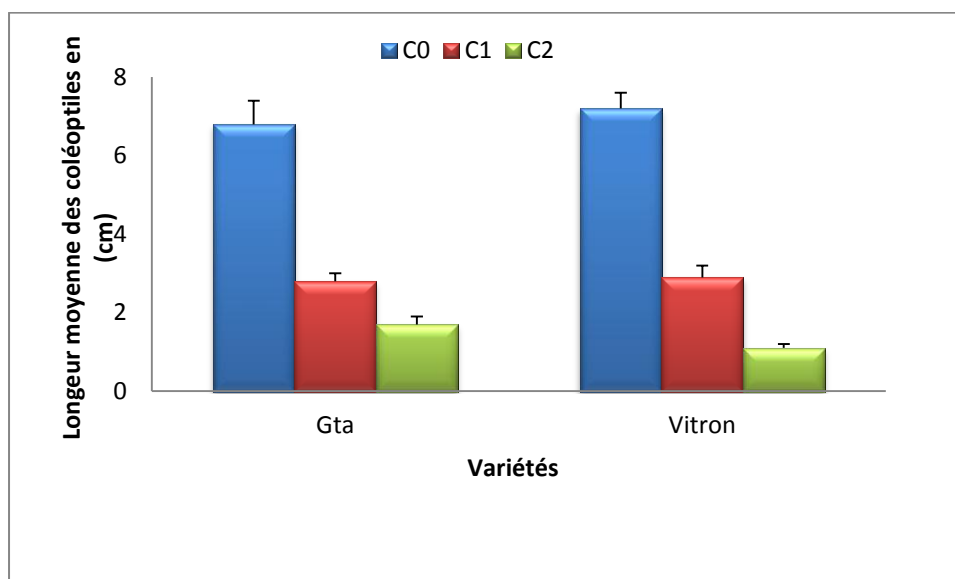


Figure.17 : Effets du plomb sur la longueur moyenne des coléoptiles des graines de blé germées dans des solutions contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb.  $C_0$  :  $0g.L^{-1}$  témoin, sans traitement,  $C_1$  :  $0,32g.L^{-1}$ ,  $C_2$  :  $0,43g.L^{-1}$ , durant 8 jours.

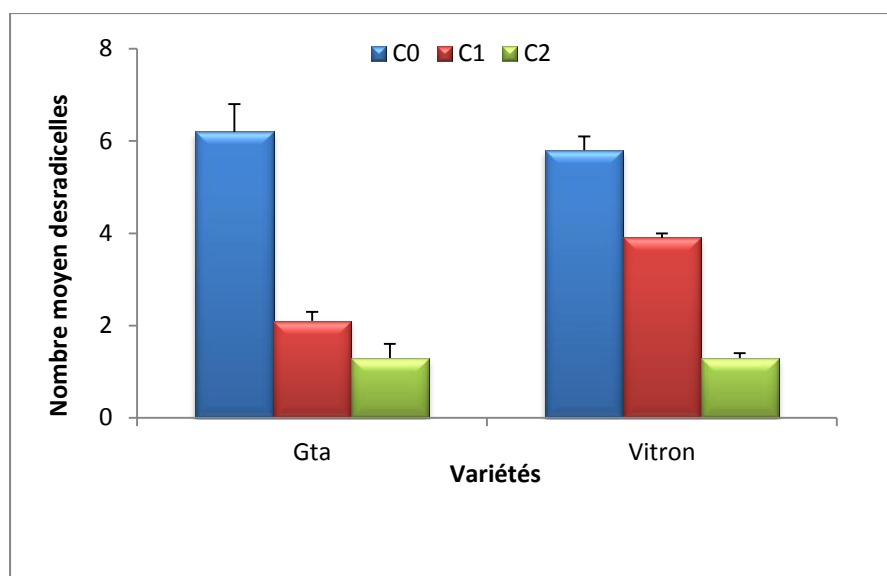


Figure.18 : Effets du plomb sur le nombre moyen des radicelles des graines de blé germées dans des solutions contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb.  $C_0$  :  $0g.L^{-1}$  témoin, sans traitement,  $C_1$  :  $0,32g.L^{-1}$ ,  $C_2$  :  $0,43g.L^{-1}$ , durant 8 jours.

**Tableau.16 : Valeurs du F observé ( $F_{obs}$ ) de l'analyse de variance à 2 critères de classification des paramètres germinatifs et pigments photorécepteurs.**

Source de variation	d.d.l.	T.G (%)	L.M.C (cm)	N.M.R.	Chl (a)	Chl (b)	Chl (a+b)	Caroténoïdes
Concentration	2	8960.13***	91.85***	84.63***	18.81***	6.61**	22.22***	96.89***
Variétés	1	24.93***	0.39ns	1.38	2.96ns	0.0ns	0.10ns	32.51***
Interaction	2	55.28***	1.22ns	3.92	4.46*	0.76ns	24.48***	38.27***
Erreur	18							
<b>Total</b>	23							

d.d.l: degré de liberté ; TG : taux de germination ; LMC : longueur moyenne des coléoptiles ; NMR : nombre moyen des racines. \*  $P < 0.05$  : différences significatives ; \*\* $P < 0.01$  : différences hautement significatives ; \*\*\*  $P < 0.001$  : différences très hautement significatives ; ns : non significatif.

### 1.3. Contenu en chlorophylles et en caroténoïdes

L'examen des résultats (**Tableau 16**) montre que le contenu en chlorophylles des feuilles des jeunes pousses est variable d'une manière significative ( $P < 0,01$ ), selon la variété, les traitements subis par les graines et le type de pigment. En effet, le plomb semble stimuler légèrement la synthèse de la chlorophylle totale (a+b) chez la variété Gta dur et l'inhiber chez la variété Vitron (**Figures 19, 20**). Cependant, concernant le contenu en caroténoïdes (**Tableau 16**), le plomb provoque une diminution très hautement significative ( $P < 0,001$ ) chez la variété Vitron et une élévation chez la variété Gta dur. Par contre, dans les lots témoins, il est aussi remarqué que cette première variété (Vitron), présente plus de caroténoïdes que la variété Gta dur.

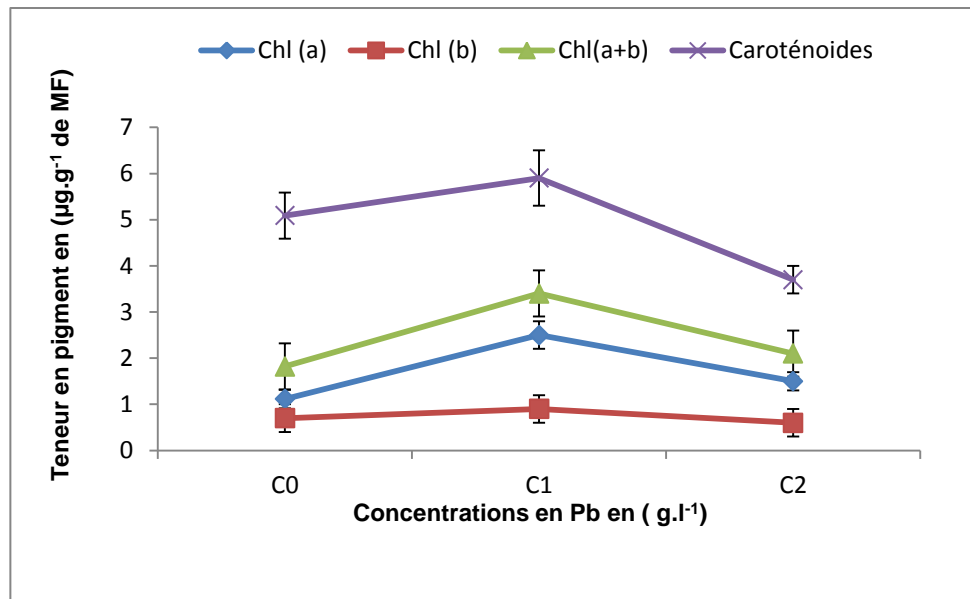


Figure.19 : Effets du plomb sur le contenu en pigments photorécepteurs des jeunes plantules) de la variété Gta dur issues de la germination des graines de blé dur dans des solutions contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb. C<sub>0</sub> : 0g.L<sup>-1</sup> témoin, sans traitement, C<sub>1</sub> : 0,32g.L<sup>-1</sup>, C<sub>2</sub> : 0,43g.L<sup>-1</sup>, durant 8jours.

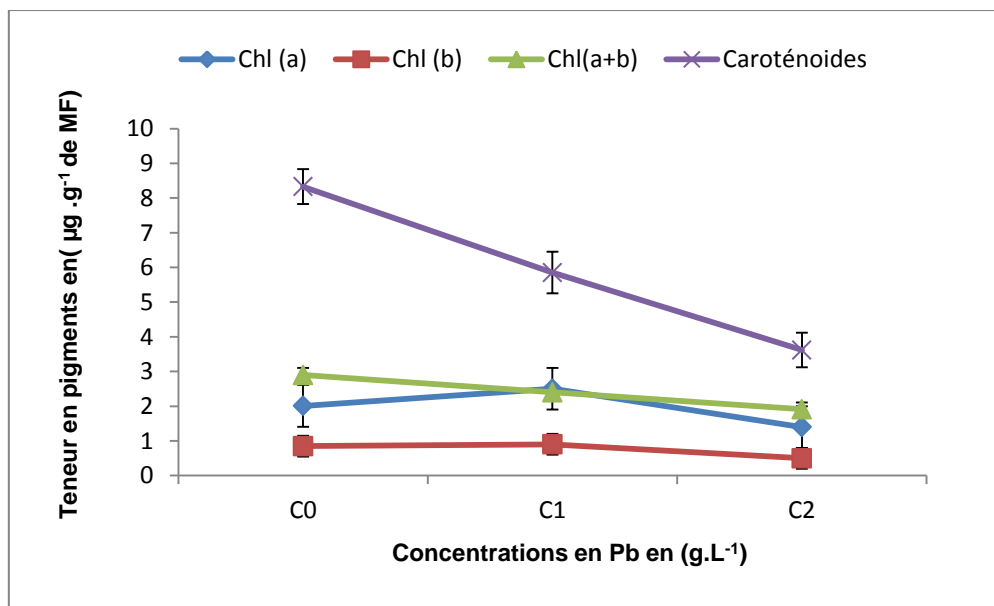


Figure.20: Effets du plomb sur le contenu en pigments photorécepteurs des jeunes plantules de la variété Vitron issues de la germination des graines de blé dur dans des solutions contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb. C<sub>0</sub> : 0g.L<sup>-1</sup> témoin, sans traitement, C<sub>1</sub> : 0,32g.L<sup>-1</sup>, C<sub>2</sub> : 0,43g.L<sup>-1</sup>, durant 8jours.

#### 1.4. Contenu en sucres solubles

Pour voir les réponses physiologiques et notamment biochimiques, nous avons en premier lieu déterminé l'effet du plomb sur le contenu en sucres solubles contenus dans les feuilles des jeunes plantules issues des graines traitées pendant 8 jours. L'observation des lots témoins a révélé que la variété Vitron contient presque deux fois plus de sucres que la variété

Gta dur (**Figures 21, 22**). Par ailleurs, l'exposition au plomb, nous a permis de constater que celui-ci a causé une augmentation importante et très hautement significative ( $P < 0,001$ ) des sucres solubles contenus dans les feuilles, surtout pour celles traitées avec la plus forte concentration (1,3 mM) avec 1,9 et 1,6  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  de matière fraîche (MF) pour respectivement la variété Gta dur et Vitron (**Tableau 17**).

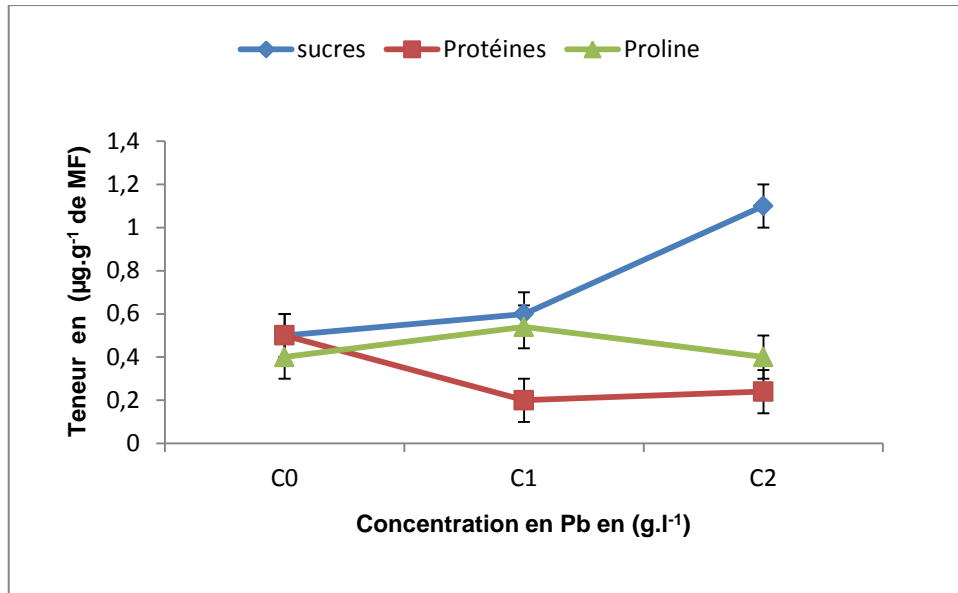


Figure.21: Effets du plomb sur le contenu en sucres solubles, protéines et proline des jeunes plantules de la variété Gta dur issues de la germination des graines de blé dur dans des solutions contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb. C<sub>0</sub>: 0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  témoin, sans traitement, C<sub>1</sub>: 0,32 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , C<sub>2</sub>: 0,43 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , durant 8 jours.

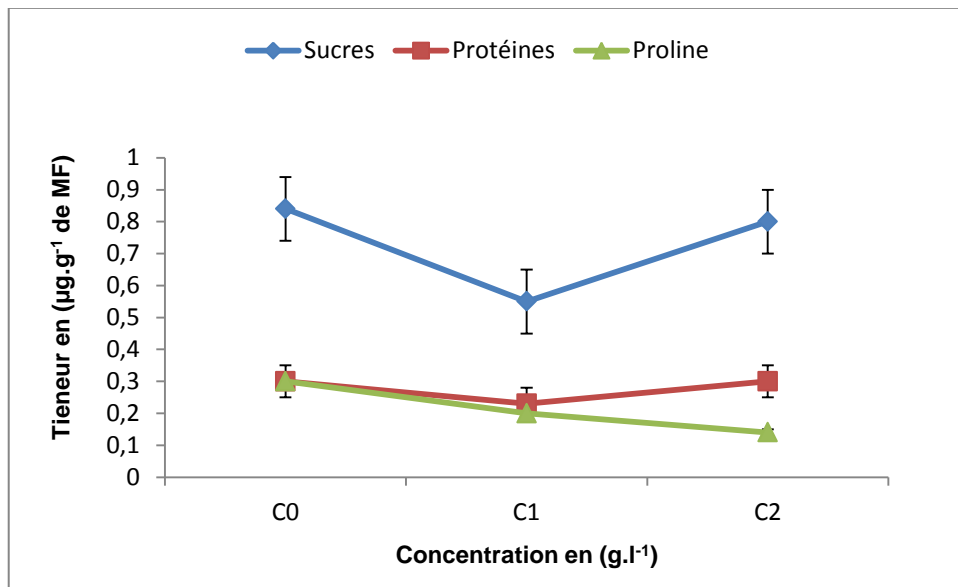


Figure.22: Effets du plomb sur le contenu en sucres solubles, protéines et proline des jeunes plantules de la variété Vitron, issues de la germination des graines de blé dur dans des solutions contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb. C<sub>0</sub>: 0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  témoin, sans traitement, C<sub>1</sub>: 0,32 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , C<sub>2</sub>: 0,43 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , durant 8 jours.

**Tableau .17 : Valeurs du F observé ( $F_{obs}$ ) de l'analyse de variance à 2 critères de classification des marqueurs biochimiques et enzymatiques de la germination.**

Source de Variation	d.d. l	Sucres	Protéines	Proline	lipase	$\beta$ amylase	( $\alpha+\beta$ ) amylase	POX	CAT
Conc	2	54.2 <sup>3*</sup>	15.66 <sup>***</sup>	0.91ns	115.72 <sup>3*</sup>	28.68 <sup>***</sup>	13.09 <sup>***</sup>	52.85 <sup>3*</sup>	9.6 <sup>3*</sup>
Variétés	1	0.01ns	1.75ns	0.63ns	784.08 <sup>3*</sup>	12.86 <sup>***</sup>	16.23 <sup>***</sup>	110.4 <sup>3*</sup>	55.9 <sup>**</sup>
Con X var	2	4.68 <sup>*</sup>	8.78 <sup>**</sup>	1.0ns	13.82 <sup>3*</sup>	38.77 <sup>***</sup>	22.85 <sup>***</sup>	27.0 <sup>3*</sup>	29.2 <sup>**</sup>
Erreur	18								
<b>Total</b>	23								

d.d.l: degré de liberté ; POX : peroxydase ; CAT : catalase. \*  $P < 0.05$  : différences significatives ; \*\* $P < 0.01$  : différences hautement significatives ; \*\*\*  $P < 0.001$  : différences très hautement significatives; ns: non significatif. NB : Les valeurs de l' $\alpha$  amylase ne sont pas présentées dans le tableau parce qu'elles sont non significatives.

### 1.5. Contenu en protéines

L'observation des **Figures 21 et 22** suggère que le contenu en protéines des plantes est plus important chez la variété Vitron ( $0,5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  de MF) que son homologue Gta dur ( $0,3 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  de MF). Par contre, chez cette dernière variété, le traitement des graines par le plomb a ralenti la synthèse des protéines dans les plantules issues de ces graines, d'une manière très hautement significative ( $P < 0,001$ ), particulièrement celles traitées avec la concentration 1mM. A l'inverse, chez la deuxième variété Vitron, le plomb ne semble pas exercer d'effet notable (**Tableau 17**).

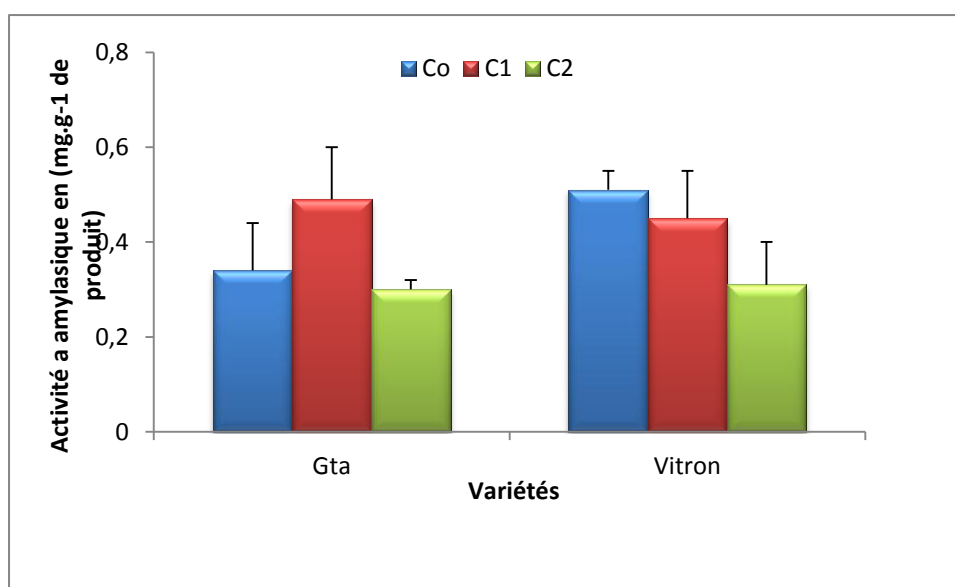
### 1.6. Contenu en proline

L'effet du Pb sur le contenu en proline des feuilles de jeunes plantules n'est pas significatif ( $P > 0,05$ ). Toutefois, les résultats obtenus montrent que la variété Gta dur contient plus d'acide aminé libre, proline que la variété Vitron ( $0,44$  contre  $0,3 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  de MF) respectivement. Par ailleurs, on a remarqué une légère stimulation de la synthèse de cet acide aminé chez la variété Gta dur ( $0,54 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  de MF) causée par la concentration 1mM et une réduction chez la variété Vitron (**Figures 21, 22**). Dans cette deuxième variété, l'effet des ions

(Pb<sup>2+</sup>) sur la teneur en proline est proportionnel à la dose appliquée, avec respectivement 0,2 µg.g<sup>-1</sup> de MF et 0,14 µg.g<sup>-1</sup> de MF pour les concentrations en plomb de 1mM et 1,3mM.

### 1.7. Activité amylasique

L'effet du plomb sur l'activité enzymatique durant le processus de germination a été analysé. Les résultats obtenus (**Figures 23, 24, 25**) montre que l'activité α amylasique n'est pas significative (P > 0,05). Seule l'activité β amylasique et globale (α+ β) a diminué chez la variété Vitron par rapport aux témoins. Par contre, celle de Gta dur a été légèrement augmentée surtout avec la dose 1mM. L'analyse statistique montre une variation très hautement significative (P < 0.001) (**Tableau 17**). La valeur du maltose exprimée en mg.g<sup>-1</sup> de produit, libérée grâce à l'action des α et β amylases est faible par rapport aux témoins. Chez la variété Vitron. Les graines ayant germé en présence des concentrations 1mM et 1,3mM montrent une réduction de l'activité amylasique globale dose-dépendante.



**Figure.23 :** Effets du plomb sur l'activité enzymatique de l'α amylase des graines de blé dur mises en germination au 4<sup>ème</sup> jour dans des solutions contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb. C<sub>0</sub>: 0g.L<sup>-1</sup> témoin, sans traitement, C<sub>1</sub>: 0,32g.L<sup>-1</sup>, C<sub>2</sub>: 0,43g.L<sup>-1</sup>, durant 8jours.

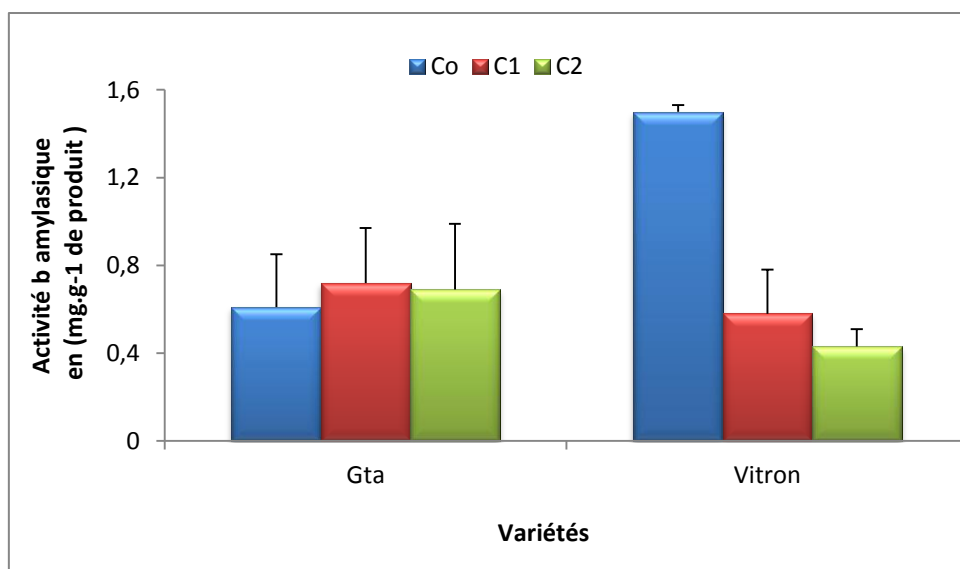


Figure.24 : Effets du plomb sur l'activité enzymatique de la  $\beta$  amylase des graines de blé dur mises en germination au 4<sup>ème</sup> jour dans des solutions contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb. C<sub>0</sub>: 0g.L<sup>-1</sup> témoin, sans traitement, C<sub>1</sub>: 0,32g.L<sup>-1</sup>, C<sub>2</sub>: 0,43g.L<sup>-1</sup>, durant 8jours.

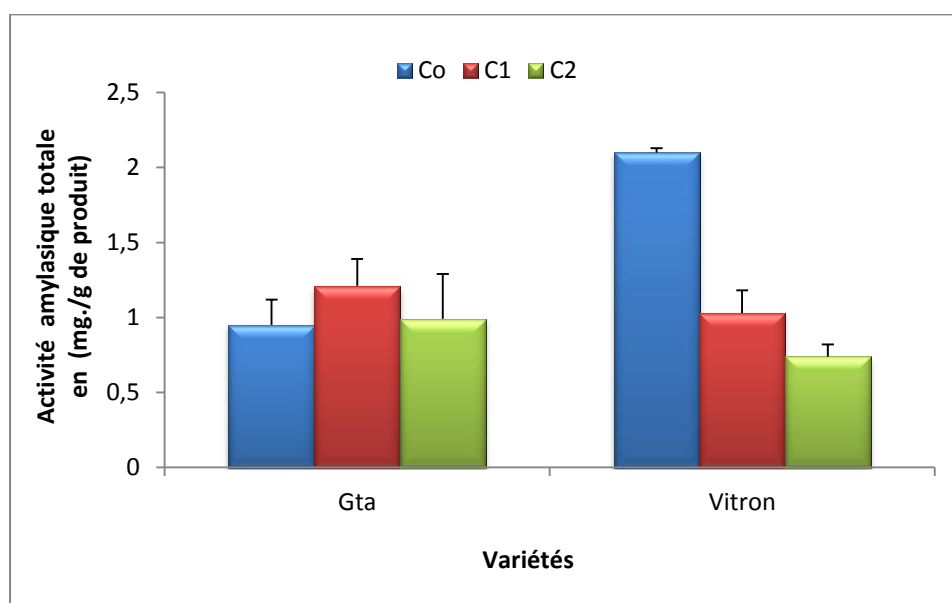
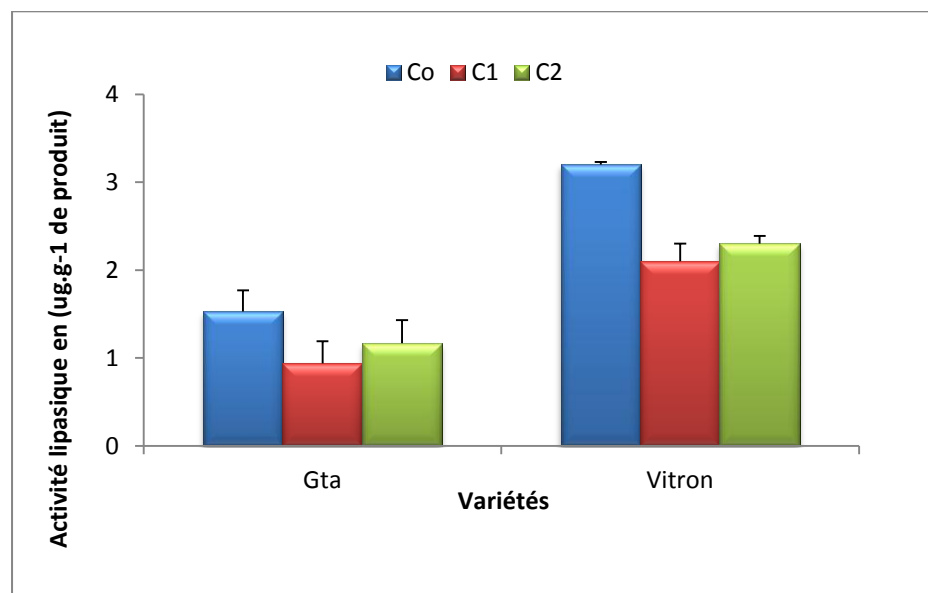


Figure.25 : Effets du plomb sur l'activité amylasique globale ( $\alpha+\beta$ ) des graines de blé dur mises en germination au 4<sup>ème</sup> jour dans des solutions contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb. C<sub>0</sub>: 0g.L<sup>-1</sup> témoin, sans traitement, C<sub>1</sub>: 0,32g.L<sup>-1</sup>, C<sub>2</sub>: 0,43g.L<sup>-1</sup>, durant 8jours.

### 1.8. Activité lipasique

Le stress métallique induit par le plomb provoque de nombreux désordres métaboliques notamment chez les enzymes hydrolasiques. Dans ce travail, l'activité lipasique des graines traitées et déterminée au 4<sup>ème</sup> jour de germination après 60 minutes de réaction

enzymatique, (temps moyen) a montré une diminution de son activité comparée aux témoins (**Figure.26**). Toutes les concentrations utilisées réduisent d'une manière très hautement significative la lipolyse provoquée par ce biocatalyseur durant la germination ( $P < 0.001$ ) (**Tableau 17**) chez les deux variétés avec des valeurs de 0.94 et 2.1Ug<sup>-1</sup> de produit pour respectivement la teneur 1mM.



**Figure.26 :** Effets du plomb sur l'activité lipasique des graines de blé dur mises en germination au 4<sup>ème</sup> jour dans des solutions contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb. C<sub>0</sub>: 0g.L<sup>-1</sup> témoin, sans traitement, C<sub>1</sub>: 0,32g.L<sup>-1</sup>, C<sub>2</sub>: 0,43g.L<sup>-1</sup>, durant 8jours.

### 1.9. Activité peroxydasique

La Figure 27, montre que l'activité de l'enzyme peroxydase varie d'une manière hautement significative entre les 2 variétés étudiées ( $P < 0.001$ ) (**Tableau 2**). Le traitement des graines par la dose la plus faible en plomb (1mM) a provoqué une légère élévation de l'activité peroxydasique non significative chez les deux variétés. Par contre, la forte concentration (1,3mM) a provoqué une réduction de l'activité enzymatique avec des valeurs de 4.59  $\mu\text{Kat.g}^{-1}$  de MF pour la variété Gta dur et 2,39  $\mu\text{Kat.g}^{-1}$  de MF de la variété Vitron.

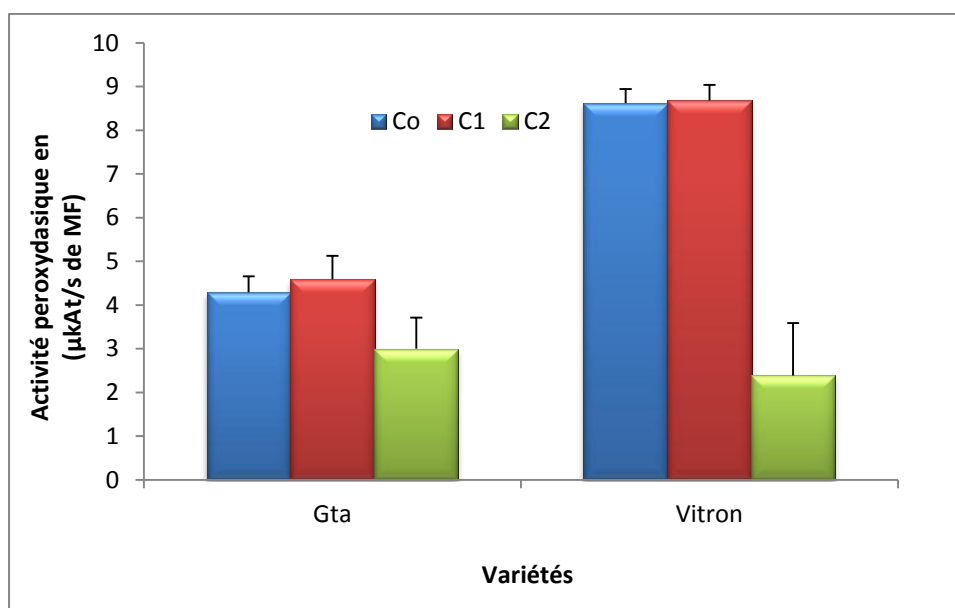


Figure.27: Effets du plomb sur l'activité de la peroxydase (POD) dans les jeunes plantules issues de la germination des graines de blé dur durant 8 jours dans des solutions contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb. C<sub>0</sub> : 0g.L<sup>-1</sup> témoin, sans traitement, C<sub>1</sub>: 0,32g.L<sup>-1</sup>, C<sub>2</sub>: 0,43g.L<sup>-1</sup>, durant 8jours.

### 1.10. Activité de la catalase

L'effet du plomb sur la catalase montre des différences très hautement significatives pour les deux variétés ( $P < 0.001$ ) (Tableau.17). La figure 28, révèle que la forte concentration en  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  (1,3mM) a inhibé de moitié l'activité de la catalase chez la variété Gta. Par contre, chez la variété Vitron, cette même teneur a stimulé légèrement l'activité de cette enzyme (catalase) avec une valeur de  $1,16 \mu\text{Kat.g}^{-1}$  de MF contre  $0,88 \mu\text{Kat.g}^{-1}$  de MF du témoin.

### 1.11. Activité du gaïacol peroxydase (GPX)

L'effet du Pb sur l'activité de l'enzyme gaïacol peroxydase (GPX) a été analysé. Les résultats (Figure.29) (Tableau.18) montrent bien l'effet inhibitif et significatif ( $P < 0.001$ ) du Pb sur l'activité de cette enzyme, principalement chez la variété Vitron où on a noté une inhibition de l'activité de cette enzyme (GPX) dans tous les traitements. Par contre, chez la seconde variété Gta, au contraire, toutes les doses utilisées, ont bien stimulé l'activité de cette enzyme avec des valeurs de  $(0,21 \times 10^{-3}$  et  $0,31 \times 10^{-3}$  nmol/min/mg de protéines) pour les doses (1mM, 1.3mM) respectivement, contre  $(0,14 \times 10^{-3}$  nmol/min/mg de protéines) du témoin.

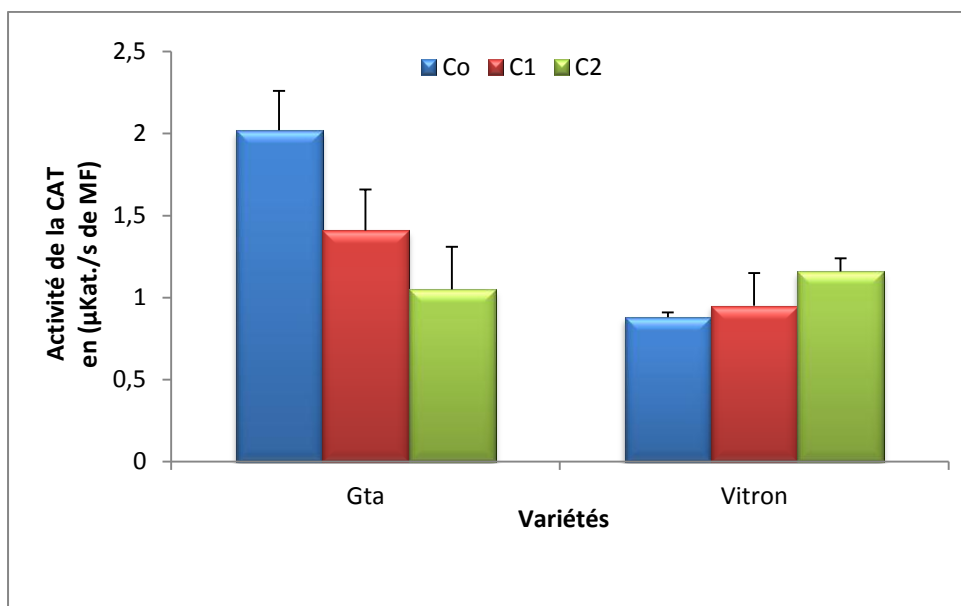


Figure.28: Effets du plomb sur l'activité de la catalase (CAT) dans les jeunes plantules issues de la germination des graines de blé dur durant 8 jours dans des solutions contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb.  $C_0$  :  $0\text{g.L}^{-1}$  témoin, sans traitement,  $C_1$ :  $0,32\text{g.L}^{-1}$ ,  $C_2$ :  $0,43\text{g.L}^{-1}$ , durant 8 jours.

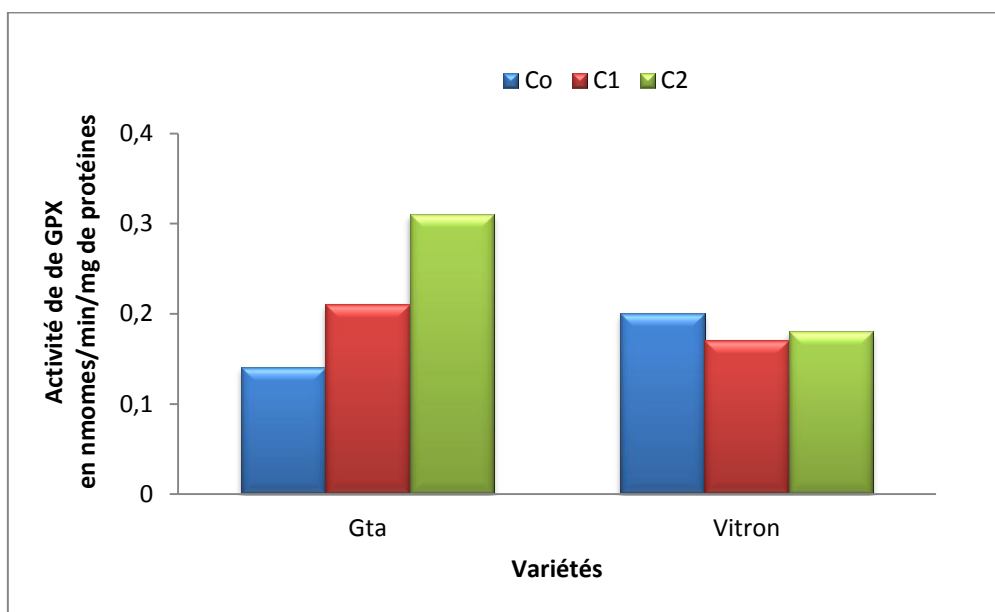


Figure.29: Effets du plomb sur l'activité du gaïacol peroxydase (GPX) dans les jeunes plantules issues de la germination des graines de blé dur durant 8 jours dans des solutions contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb.  $C_0$  :  $0\text{g.L}^{-1}$  témoin, sans traitement,  $C_1$ :  $0,32\text{g.L}^{-1}$ ,  $C_2$ :  $0,43\text{g.L}^{-1}$ , durant 8 jours.

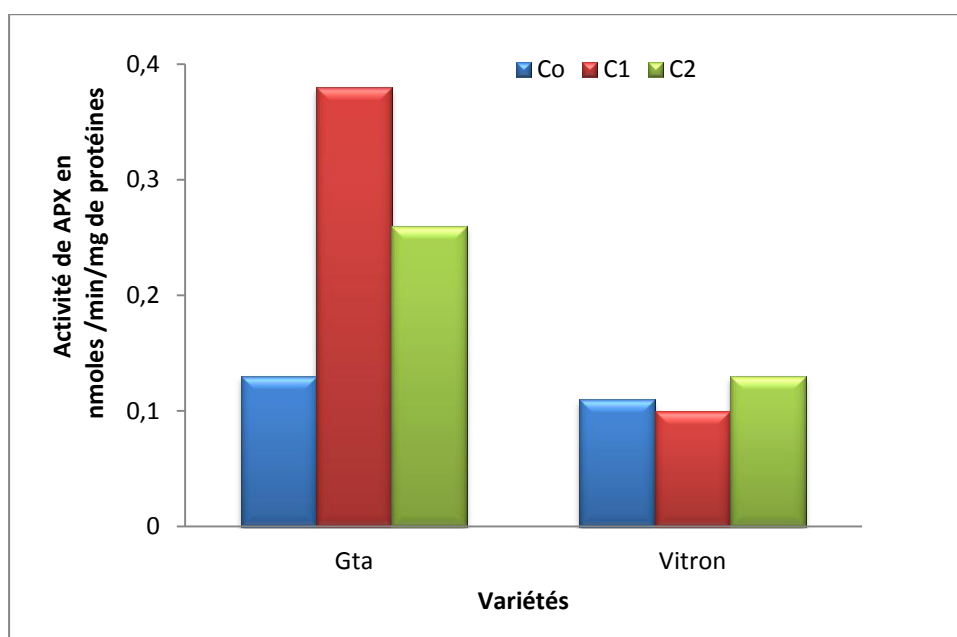
**Tableau.18 : Valeurs du F observé ( $F_{obs}$ ) de l'analyse de variance à 2 critères de classification des autres paramètres étudiés de la germination**

Source de variation	d.d.l.	Glutathion	GPX	APX	GST
Concentration	2	3.95*	3.34*	0.33ns	6.60.87***
Variétés	1	0.07ns	3.28*	0.84ns	5.48.25***
Interaction	2	2.52ns	8.15**	3.77*	9.22.90***
Erreur	18				
<b>Total</b>	23				

d.d.l: degré de liberté ; GPX : Gaïacol peroxydase ; APX : Ascorbate peroxydase ; GST : glutathion sulfotransférase. \*  $P < 0.05$  : différences significatives ; \*\* $P < 0.01$  : différences hautement significatives ; \*\*\*  $P < 0.001$  : différences très hautement significatives ; ns : non significatif.

### 1.12. Activité de l'ascorbate peroxydase (APX)

L'examen des résultats (**Figure.30**) montre que d'une manière générale, une réduction non significative ( $P < 0.5$ ) de l'activité de l'ascorbate peroxydase pour les concentrations (1mM, 1.3mM) utilisées sur la variété Vitron. Par contre, chez la seconde variété Gta, il a été constaté une stimulation notable pour les doses utilisées avec une activité culminante de (0.38 nmoles/min/mg de protéines) pour la concentration (1mM) contre, (0.13nmoles/min/mg de protéines) du témoin (**Tableau.18**).



**Figure.30:** Effets du plomb sur l'activité de l'ascorbate peroxydase (APX) dans les jeunes plantules issues de la germination des graines de blé dur durant 8 jours dans des solutions contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb.  $C_0$  :  $0g.L^{-1}$  témoin, sans traitement,  $C_1$  :  $0,32g.L^{-1}$ ,  $C_2$  :  $0,43g.L^{-1}$ , durant 8 jours.

### 1.13. Activité de l'enzyme glutathion sulfotransférase

L'analyse des résultats (**Figure.31**) concernant l'activité de l'enzyme glutathion sulfotransférase (GST) montre que le plomb a réduit d'une manière significative ( $P < 0.001$ ) l'activité de cette enzyme chez la variété Vitron et élevé chez la variété Gta avec un pic maximal pour la dose la plus faible (1mM) de (0.54nmoles/min/mg de protéines), par rapport au témoin ( $C_0$ ). En conséquence, on peut dire que le Pb a joué un double rôle selon la réaction des espèces, tantôt stimulateur comme c'est le cas avec la variété Gta traitée avec la dose la plus faible (1mM) et tantôt inhibiteur comme chez la variété Vitron traitée avec la même dose. (**Tableau.18**).

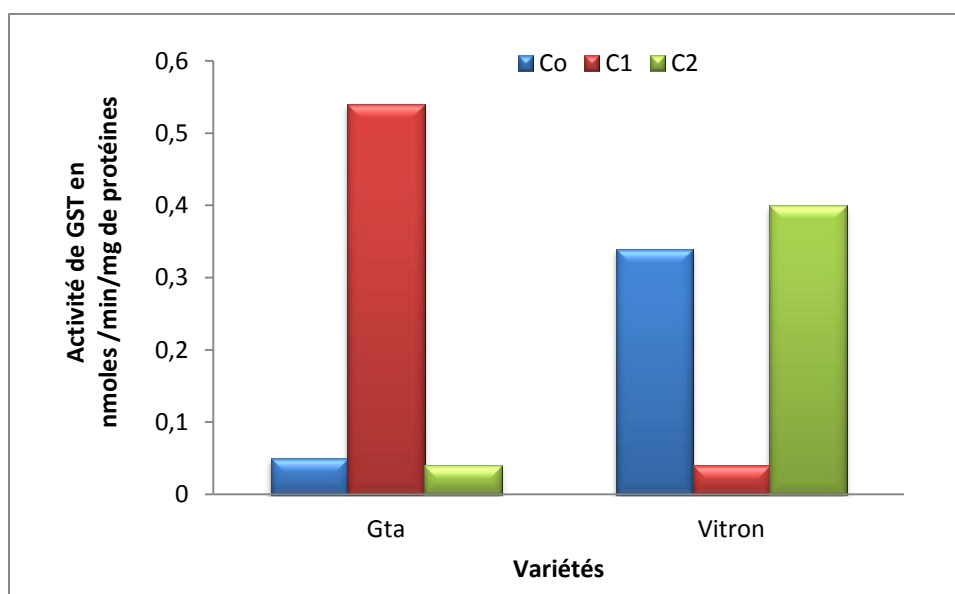
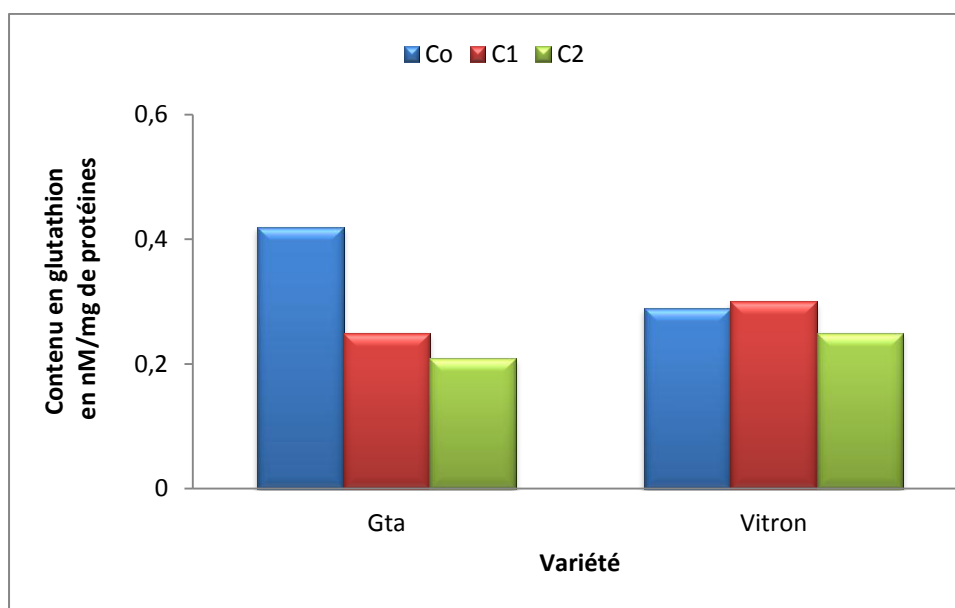


Figure.31: Effets du plomb sur l'activité du glutathion sulfotransférase (GST) dans les jeunes plantules issues de la germination des graines de blé dur durant 8 jours dans des solutions contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb.  $C_0$  :  $0\text{g.L}^{-1}$  témoin, sans traitement,  $C_1$  :  $0,32\text{g.L}^{-1}$ ,  $C_2$  :  $0,43\text{g.L}^{-1}$ .

#### 1.14. Contenu en glutathion(GSH)

L'observation des résultats (**Figure.32**), montre que la variété Gta dur présente plus de glutathion que Vitron (presque une fois et demie) dans les lots témoins ( $0,42\text{nM GSH.mg}^{-1}$  de protéine contre  $0,29\text{nM}$  de  $\text{GSH.mg}^{-1}$  de protéine). Par contre, le traitement des graines par les différentes concentrations du nitrate de plomb ( $\text{PbNO}_3$ )<sub>2</sub> provoque une réduction juste significative ( $P < 0,05$ ) de la teneur en glutathion pour tous les concentrations chez les deux variétés Gta et Vitron.



**Figure. 32:** Effets du plomb sur la teneur en glutathion dans les jeunes plantules issues de la germination des graines de blé dur durant 8 jours dans des solutions contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb. C<sub>0</sub> : 0g.L<sup>-1</sup> témoin, sans traitement, C<sub>1</sub>: 0,32g.L<sup>-1</sup>, C<sub>2</sub>: 0,43g.L<sup>-1</sup>, durant 8jours.

## 2. Discussion

La germination d'une semence est soumise à une régulation très précise à laquelle concourent de multiples facteurs biochimiques et enzymatiques. Après l'imbibition, l'intensité respiratoire augmente et reste constante pendant toute la germination *sensu-stricto* et augmente à nouveau dès que les premières racicules s'allongent, il en résulte en particulier une hydrolyse plus rapide des réserves de la semence, conduisant à l'apparition des sucres solubles, lesquels se dégradent à leur tour pour fournir l'énergie nécessaire au développement de l'embryon. Ainsi, la germination est inhibée si un simple élément affecte ce processus.

Le Plomb est parmi les éléments les plus toxiques qui existent dans la nature. Ses effets négatifs sur la croissance et la photosynthèse des plantes ne sont plus à démontrer (Ashraf *et al.*, 2011). Il cause aussi de nombreuses inhibitions enzymatiques, modifie le statut hydrique et déséquilibre la nutrition minérale des végétaux (Sharma et Dubey, 2005). Comme beaucoup de recherches, cette étude a permis de mettre en évidence l'effet défavorable du plomb sur la germination des variétés Gta dur et Vitron étudiées. Les résultats obtenus montrent que les solutions contaminées par le plomb qui ont été absorbées par les graines lors

de la phase d'imbibition et qui ont pénétré dans l'embryon ont réduit la germination (Wierzbicka et Obidzinska, 1998). Il a été montré que les fortes concentrations en Pb provoquent une réduction de la germination et la croissance des jeunes plantules (Mesmar et Jaber, 1991). Ces résultats sont en parfait accord avec d'autres travaux qui ont observé le même effet avec des concentrations élevées de plomb sur des graines de riz (Chatterjee *et al.*, 2004) ou encore, sur des graines de *Phaseolus vulgaris* et *Pisum sativum*, qui sont considérés comme espèces sensibles aux métaux lourds et qui ne germent pas, même en présence de très faibles concentrations de ces polluants (Serigin et Ivanov, 2001). Des résultats similaires ont été également obtenus sur la carotte et le radis (Chen *et al.*, 2002). Toutes ces recherches ont montré que le plomb est capable de réduire la faculté germinative, la croissance des coléoptiles et le nombre de radicules par graine d'espèces végétales cultivées. Par ailleurs, en ce qui concerne l'effet du plomb sur les pigments foliaires, les résultats présentés sont corroborés par d'autres travaux cités dans la littérature, Padjama *et al.*, (1990); Moreno-Casseles *et al.*, (2000); Kosobruckov *et al.*, (2004); Qureshi *et al.*, (2005); Chen *et al.*, (2007) ; Gopal et Rizvi (2008) qui rapportent une diminution des pigments (chlorophylles et caroténoïdes) contenus dans les feuilles de jeunes plantules issues de graines traitées par les métaux lourds, notamment le plomb et le cadmium. En outre, la chlorophylle (b) semble être plus sensible que la chlorophylle (a) (Wozny *et al.*, 1995 ; Vodnik *et al.*, 1999). Toutefois ces effets varient selon les espèces végétales, la teneur du polluant et la durée d'exposition. Les mécanismes de réduction pigmentaire sont en partie élucidés. Le plomb induit l'activité chlorophyllase dans les feuilles, mais le mécanisme principal semble être l'inactivation de la synthèse de ces pigments. Le plomb interagit à ce niveau de deux manières : i) d'une façon directe en se substituant aux ions bivalents liés aux métallo-enzymes. C'est notamment le cas de la  $\delta$ -aminolévulinate déshydrogénase ou ALAD qui est à la base de la synthèse des chlorophylles et dont l'ion  $Zn^{2+}$  est remplacé par  $Pb^{2+}$  ou ii), d'une façon indirecte, en induisant une carence en ces ions bivalents. En effet, il est admis maintenant que les chloroses foliaires sont des signes de carence en  $Fe^{2+}$ , indispensable à la synthèse de chlorophylles (Foy *et al.*, 1978). Concernant les caroténoïdes, il a été trouvé que la variété Vitron contient plus de caroténoïdes que la variété Gta dur dans les lots témoins. Par contre, chez les graines traitées par le plomb, il a été noté une teneur relativement élevée chez la variété Gta dur par rapport à son témoin. Cette élévation de la concentration est sans doute une réaction positive pour contrecarrer le stress métallique ou diminuer son effet. Sachant que cette catégorie de pigments joue un rôle essentiel dans l'élimination des radicaux libres comme le carotène qui permet l'élimination des radicaux peroxydes lipidiques (Palozza et Kinsky, 1992), ou encore

dans la désactivation physique de l'oxygène singulet ( $O_2^-$ ), en particulier dans le cas du lycopène (Sundquist *et al.*, 1994). Pour les autres marqueurs biochimiques, sucres solubles, protéines et l'acide aminé proline, il a été noté que la toxicité du Pb induit un accroissement des concentrations des tissus du mésophylle foliaire des jeunes plantules issues de graines traitées. Ceci est dû certainement à une induction de ces marqueurs physiologiques provoquée par l'effet de l'exposition au stress métallique (Mesmar et Jaber, 1991). Ce dernier induit à son tour un stress protéique concernant de nombreuses enzymes antioxydantes et d'autres enzymes impliquées dans la biosynthèse des GSH et PC et d'autres protéines de choc thermique (Srivastava *et al.*, 2004). Pour les protéines et les sucres solubles, leur synthèse est ralentie voire même inhibée par des concentrations élevées en polluants (Chen *et al.*, 2002 ; Chatterjee *et al.*, 2004) et stimulée par les faibles teneurs. Cette stimulation dans la concentration des protéines est expliquée par Rauser, (1995) par la synthèse de phytochélatines pour neutraliser les fortes teneurs du Pb.

La proline est considérée comme agent non spécifique de système de défense des organismes végétaux contre la toxicité des métaux lourds. Elle est considérée jouer plusieurs rôles de protection (Sharma et Shanker, 2005) notamment dans l'inhibition de la peroxydation lipidique (Mehta et Gaur, 1999), la fixation des radicaux libres (Alia *et al.*, 2001) et aussi comme chélateur des métaux (Fargo et Mullen, 1979). Nos résultats sont identiques à ceux trouvés par Chen *et al.*, (2002) qui indiquent que la teneur en proline augmente quand les doses de traitement sont faibles et qui diminue d'une manière drastique quand celles-ci sont élevées. L'explication de l'élévation de la teneur en proline chez les graines traitées avec les fortes teneurs est la formation d'un complexe non toxique (Proline-Pb) en chélatant le plomb. C'est un mécanisme de détoxification. Par ailleurs, le traitement des graines par des teneurs élevées en métaux lourds induisent des changements sur le plan moléculaire qui affectent les fonctions physiologiques essentielles et le métabolisme est endommagé par le blocage et l'inhibition de l'activité enzymatique régissant les réactions de synthèse. L'activité de nombreuses enzymes est modifiée. Par exemple, le Pb réduit considérablement l'activité des hydrolases (amylases, lipases et protéases) durant le processus de germination. L'activité de toutes les enzymes étudiées -  $\alpha$ - amylase,  $\beta$ -amylase, activité globale ( $\alpha + \beta$ ) et lipase a été diminuée. Des travaux antérieurs conduits par d'autres chercheurs ont mis en évidence le même phénomène d'inhibition et d'activation de l'enzyme  $\alpha$  amylase sur des graines du petit pois (*Pisum sativum* L.) (Mihoub *et al.*, 2005) et du blé cultivé (*Triticum aestivum* L.) (Lamhamdi *et al.*, 2011).

Signalons par ailleurs, que les amylases sont des enzymes actives dans le processus de germination par leur action de dégradation de l'amidon pour fournir l'énergie essentielle à la multiplication cellulaire de l'embryon, et que son inhibition explique bien la réduction de la faculté germinative et la croissance des jeunes pousses. Il est probable que l'inhibition de ces enzymes (amylases) provient d'un effet direct de l'ion ( $Pb^{2+}$ ) qui bloque l'ion ( $Ca^{2+}$ ) qui est essentiel pour l'activité enzymatique (Hong, 2003). En général, le plomb inhibe les activités enzymatiques et possède une constante d'inactivation ( $K_i$ ) comprise entre  $10^{-5}$  et  $2 \cdot 10^{-4}$  M, c'est à dire 50% des activités enzymatiques sont inhibées dans cette gamme de concentrations (Seregin et Ivanov, 2001). Cette inactivation enzymatique est due, soit à une liaison au niveau du site catalytique, soit ailleurs sur la protéine, entraînant ainsi une modification de la structure tertiaire. Le plomb peut également se lier aux groupements  $-COOH$  de la protéine et engendrer les mêmes effets. En revanche, il existe aussi une légère stimulation causée par les faibles teneurs en Pb (Ernst *et al.*, 1992). Cette stimulation est due à une activation du métabolisme cellulaire par exemple, une absorption d' $O_2$  dans les feuilles de tabac (Prasad *et al.*, 2001), ou une augmentation de l'activité du P.S.II (photosystème II), activité photosynthétique (Krupa et Baszynski, 1995).

Concernant l'effet du (Pb) sur les enzymes de défense et de détoxification, les traitements des graines avec les fortes concentrations réduisent et diminuent l'activité de ces enzymes. Cette inhibition est le résultat d'un stress oxydatif causé par la pénétration des ions plomb ( $Pb^{+2}$ ). Ce stress est un déséquilibre entre les espèces réactives de l'oxygène et les antioxydants (Mittler *et al.*, 2004 ; Qureshi *et al.*, 2007). Les peroxydases et les catalases sont deux catégories d'enzymes qui facilitent respectivement la formation et l'élimination de l'eau oxygénée qui est toxique pour le métabolisme cellulaire ( $H_2O_2 \rightarrow 2H_2O + O_2$ ). Dans les graines traitées par le plomb, l'activité de ces antioxydants dans un premier temps semble augmenter (Reddy *et al.*, 2005) pour les faibles concentrations. Par exemple, l'activité catalasique (CAT) croît sous l'effet phytotoxique du plomb et cet accroissement est expliqué par une induction de substrat dans le but de maintenir un niveau faible de  $H_2O_2$  comme mécanisme d'adaptation (Reddy *et al.*, 2005). Par contre, l'effet des doses élevées de ce polluant s'est traduit par une réduction, de l'activité enzymatique de ces antioxydants impliqués dans la défense contre le stress oxydatif chez les deux variétés étudiées, Vitron et Gta dur.

### 3. Résultats de la croissance

#### 3.1. Surface foliaire et poids spécifique des feuilles

Les résultats obtenus (Tableau) montrent que le traitement des plantes par le plomb a diminué la surface foliaire des 1<sup>ères</sup> feuilles, 2<sup>èmes</sup> feuilles et 3<sup>èmes</sup> feuilles chez la variété Gta par rapport aux témoins. Chez la seconde variété Vitron, le plomb a exercé le même effet sur les premières feuilles notamment avec la faible concentration (C<sub>1</sub>: 150mg.Kg<sup>-1</sup> de sol). Par contre, pour les autres feuilles (2<sup>èmes</sup> et 3<sup>èmes</sup> feuilles), le plomb ne semble pas avoir d'effet négatif sur la surface foliaire, bien au contraire, il a légèrement favorisé leur développement.

**Tableau.19 : Valeurs moyennes des paramètres physiologiques étudiés (a)Gta, (b) Vitron.**

#### (a) Gta

	N° de feuilles	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
<b>SF en (cm<sup>2</sup>)</b>	Feuille 1	4.41±2.32	3.30±0.35	3.41±0.23	3.12±0.05
	Feuille 2	6.50±0.45	5.34±0.17	4.20±0.15	5.80±0.2
	Feuille 3	8.40±0.30	8.063±0.05	6.30±1.15	7.05±0.7
<b>PSF (mg.cm<sup>-2</sup>)</b>	Feuille 1	35.70±0.85	33.54±0.78	30.85±0.20	31.08±0.63
	Feuille 2	17.90±0.78	17.3±0.65	25.23±0.68	20.81±0.51
	Feuille 3	26.52±0.37	24.34±0.77	32.9±0.3	26.52±0.81
<b>TRE (en %)</b>	Feuille 1	83.60	96 (+14.83%)	93.94 (+12.36%)	94.60 (+13.15%)
	Feuille 2	56.01	61 (+8.9%)	35.55 (-36.53%)	56.40 (+0.7%)
	Feuille 3	95.20	94.90 (-0.32%)	94.04 (-1.22%)	91.13 (-4.28%)

**(b) Vitron**

	N° feuille	Co	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
<b>SF en (cm<sup>2</sup>)</b>	Feuille 1	3.54±1.02	2.7±0.15	3.9±0.15	3.8±0.1
	Feuille 2	4.8±0.23	4.95±0.10	5.7±0.38	6.15±0.22
	Feuille 3	5.5±0.25	5.7±0.3	6.06±0.42	6.93±0.6
<b>PSF (mg.cm<sup>-2</sup>)</b>	Feuille 1	23.72±0.36	28.62±0.65	29.0±0.52	31.93±1.11
	Feuille 2	19.40±0.43	21.71±0.56	22.35±0.40	19.70±0.35
	Feuille 3	24.21±0.77	24.43±0.68	25.50±0.58	36.40±1.10
<b>TRE (en %)</b>	Feuille 1	88.43	93.80 (+6.07%)	92.1 (+4.15%)	92.14 (+4.2%)
	Feuille 2	89.25	93.71 (+5%)	94.74 (+6.15%)	94.1 (+5.43%)
	Feuille 3	92.74	92.81 (+0.75%)	87.30 (-5.87%)	93.92 (+1.3%)

Concernant le poids spécifique des feuilles (PSF), le plomb a provoqué une stimulation notable de la biomasse des feuilles issues de plantes ayant poussé sur des sols contenant des concentrations élevées par rapport aux témoins chez la variété Vitron. Les quantités les plus importantes ont été enregistrées dans les 1<sup>ères</sup> et 3<sup>èmes</sup> feuilles induites par la teneur la plus forte en plomb (C<sub>3</sub>: 500mg.Kg<sup>-1</sup> de sol). Pour l'autre variété Gta, toutes les concentrations en le plomb ont réduit la biomasse des premières feuilles de la croissance. Par ailleurs, dans les 2<sup>èmes</sup> et 3<sup>èmes</sup> feuilles, la faible dose a diminué la biomasse alors que les fortes doses (C<sub>2</sub>: 300mg.Kg<sup>-1</sup> de sol et C<sub>3</sub>: 500mg.Kg<sup>-1</sup> de sol) ont augmenté la matière sèche produit par unité de surface foliaire.

**3.2. Teneur relative en eau (T.R.E)**

L'observation des résultats (**Tableau.19**) suggère que traitement des plantes par le plomb a augmenté légèrement la TRE des premières et deuxièmes feuilles de la variété Gta. Cette augmentation est comprise entre (+0.7 et +14%) par rapport aux concentrations utilisées et les témoins. Par contre, les doses (C<sub>1</sub> et C<sub>2</sub>) ont diminué d'une façon notable la TRE des deuxièmes et troisièmes feuilles avec une valeur drastique causée par la concentration C<sub>2</sub> des deuxièmes feuilles. (-36.53%). Concernant la variété Vitron, Les valeurs obtenues ont montré que presque toutes les concentrations utilisées ont provoqué une accumulation supplémentaire d'eau dans les tissus du mésophylle foliaire par rapport aux témoins, à l'exception de la dose (C<sub>2</sub>) des troisièmes feuilles qui a causé une réduction de la TRE (-5.87%) par rapport au témoin.

### 3.3. Contenu en chlorophylles (a)

L'effet du plomb sur la teneur en chlorophylle (a) des feuilles des plantes ayant poussé sur un sol contenant différentes concentrations en plomb a été mis en évidence. L'examen des résultats (**Figure.33**) montre que celle-ci est variable et très hautement significative ( $P < 0.001$ ) (**Tableau.20**) selon la variété et le traitement. En effet, le plomb semble stimuler la synthèse de la chlorophylle (a) pour les 2 variétés. L'application des doses croissantes en Pb ( $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ) pour la variété Vitron a augmenté la teneur en chlorophylle (a) de (17.3, 17.65 et 16.6  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  de MF) respectivement par rapport au témoin ( $C_0$ : 14.76  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  de MF). Le même constat est fait pour la variété Gta, les valeurs respectives obtenues sont élevées (14.44, 15.75, 13.67  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  de MF) par rapport au témoin ( $C_0$ : 13.18  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  de MF).

**Tableau.20 : Valeurs du F observé ( $F_{\text{obs}}$ ) de l'analyse de variance à 2 critères de classification des paramètres de la croissance et pigments photorécepteurs.**

Source de variation	d.d.l.	Chl (a)	Chl (b)	Chl (a+b)	Caroténoïdes	Protéines	Glutathion
Concentration	2	10.66***	10.66***	9.36***	5.17**	9.18***	11.54***
Variétés	1	45.01***	45.01***	24.52***	227.68***	1.31ns	13.77***
Interaction	2	0.55ns	0.55ns	2.08ns	2.64ns	1.69ns	5.4**
Erreur	18						
<b>Total</b>	23						

d.d.l: degré de liberté ; Chl (a): chlorophylle (a) ; Chl (b): chlorophylle (b); Chl (a+b): chlorophylle totale (a+b). \*  $P < 0.05$  : différences significatives ; \*\*  $P < 0.01$  : différences hautement significatives ; \*\*\*  $P < 0.001$  : différences très hautement significatives ; ns : non significatif.

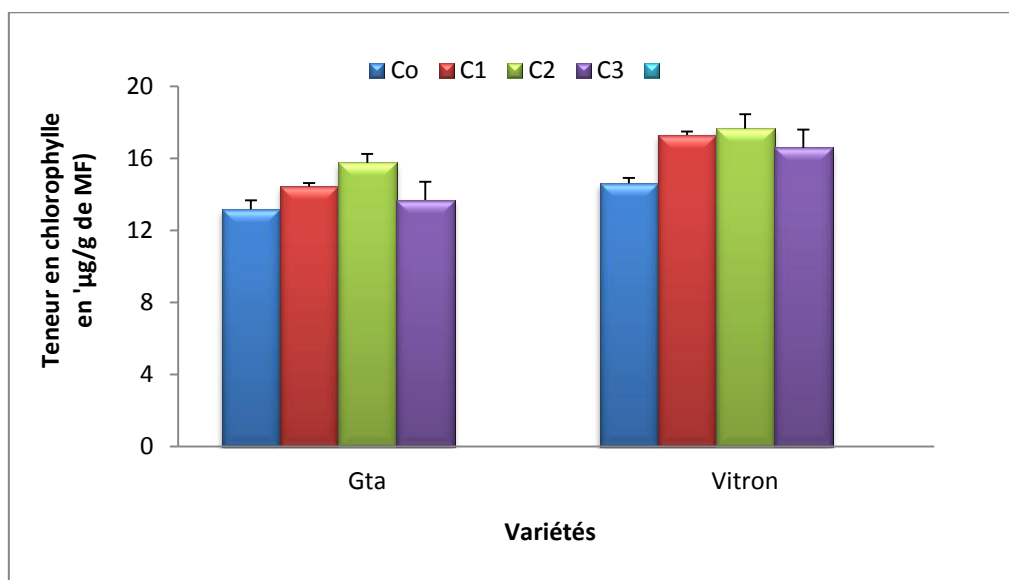
### 3.4. Contenu en chlorophylle (b)

L'observation des résultats (**Figure. 34**) montrent que la variété Gta renferme plus de chlorophylle (b) que la variété Vitron. Concernant l'effet du Pb sur la synthèse de la chlorophylle (b), il est constaté une stimulation très hautement significative ( $P < 0.001$ ) (**Tableau.20**) chez les deux variétés comparativement aux témoins. C'est la concentration

(C<sub>2</sub>: 300mg.Kg<sup>-1</sup> de sol) qui a favorisé le contenu en chlorophylle (b) avec des valeurs respectives de (7.44 et 2.62 µg.g<sup>-1</sup> de MF) pour les variétés concernées Gta et Vitron.

### 3.5. Contenu en chlorophylle totale (a + b)

En ce qui concerne, l'effet du Pb sur la teneur totale de la chlorophylle, l'observation des résultats montre l'existence de différences très hautement significatives (P<0.001) concernant ce paramètre (**Tableau.20**), (**Figure. 35**). En effet, on a abouti aux mêmes constats que la chlorophylle (a) et la chlorophylle (b), c'est-à-dire que les 2 variétés présentent des teneurs importantes chez les plantes traitées que celles non traitées (Témoins) ; il est aussi constaté que la variété Gta contient plus de chlorophylle totale que la variété Vitron et ceci chez l'ensemble des plantes aussi bien traitées que non traitées.



**Figure.33 : Effet du plomb sur le contenu de chlorophylles (a) dans les plantules issues de la germination des graines de blé dur durant 45 jours de croissance sur un substrat sol contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb. C<sub>0</sub> : 0 mg.Kg<sup>-1</sup> témoin, sans traitement, C<sup>1</sup>: 150mg.Kg<sup>-1</sup>, C<sub>2</sub>: 300mg.Kg<sup>-1</sup> et C<sub>3</sub> : 500 mg.Kg<sup>-1</sup>.**

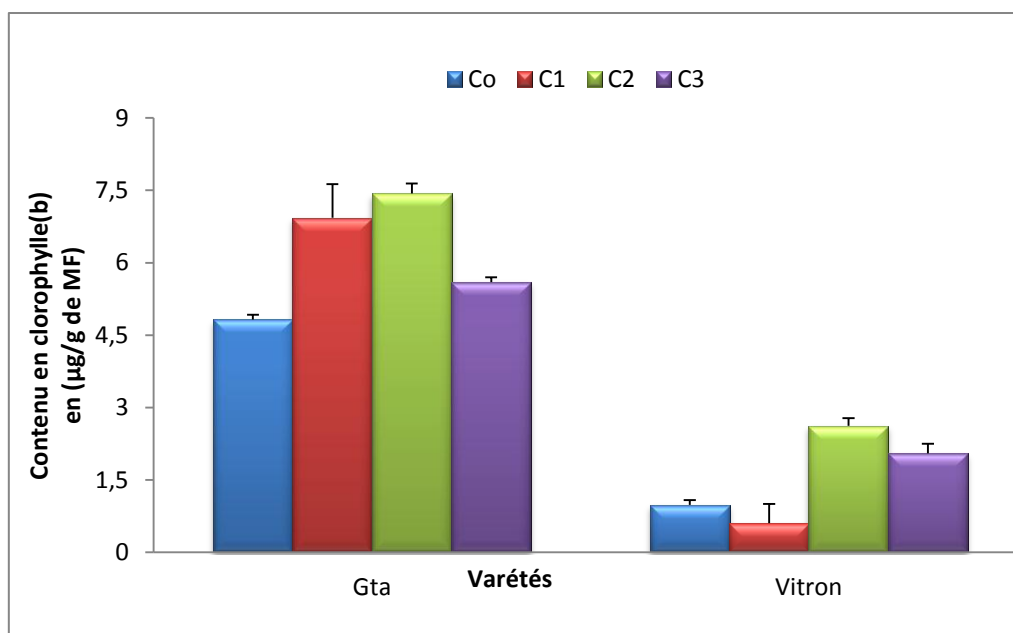


Figure.34 : Effet du plomb sur le contenu en chlorophylle (b) dans les plantules issues de la germination des graines de blé dur durant 45 jours de croissance sur un substrat sol contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb.  $C_0$  :  $0 \text{ mg.Kg}^{-1}$  témoin, sans traitement,  $C^1$ :  $150 \text{ mg.Kg}^{-1}$ ,  $C_2$ :  $300 \text{ mg.Kg}^{-1}$  et  $C_3$  :  $500 \text{ mg.Kg}^{-1}$ .

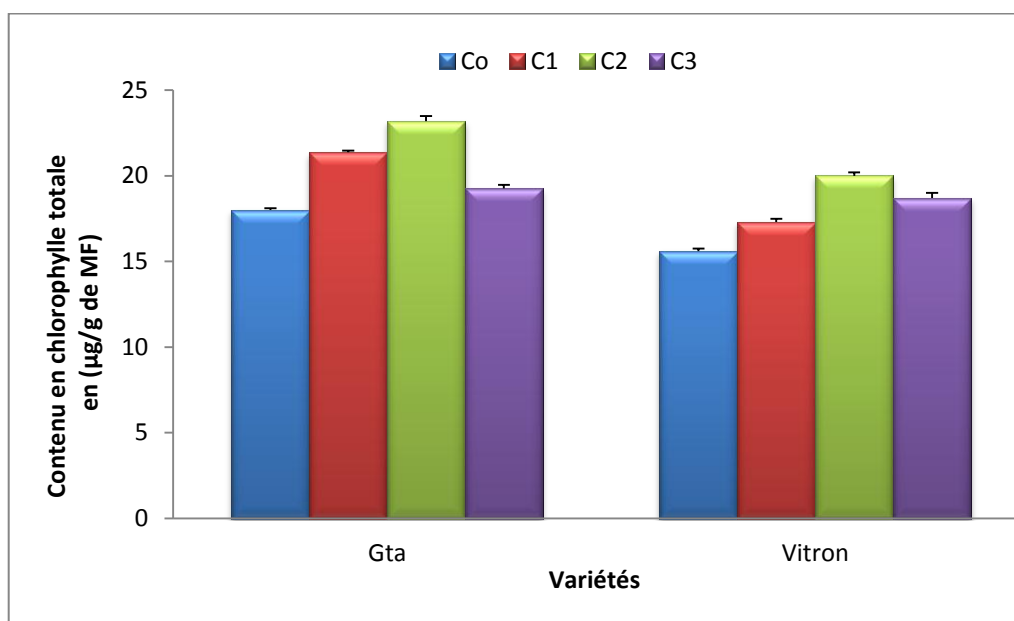
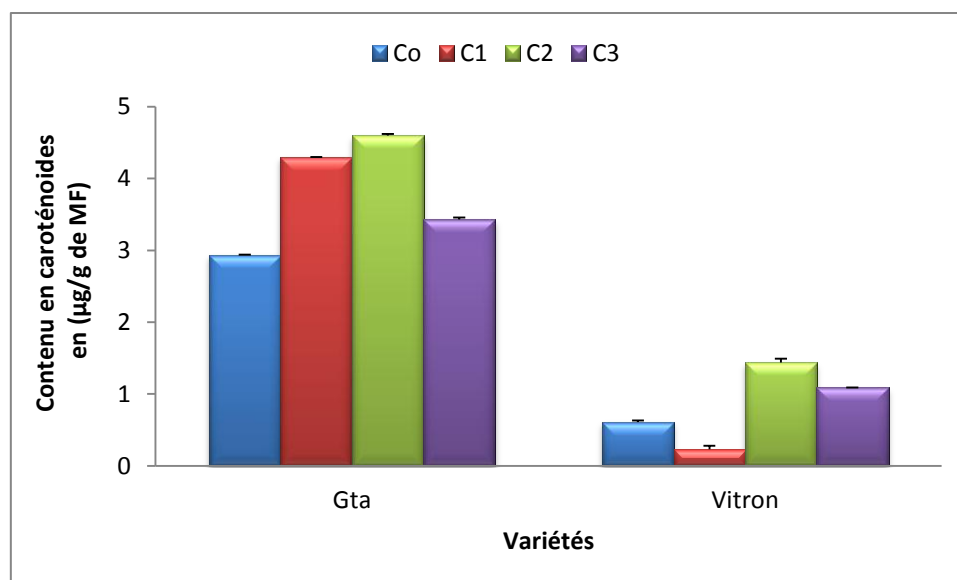


Figure.35 : Effet du plomb sur le contenu en chlorophylles totale (a+b) dans les plantules issues de la germination des graines de blé dur durant 45 jours de croissance sur un substrat sol contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb.  $C_0$  :  $0 \text{ mg.Kg}^{-1}$  témoin, sans traitement,  $C_1$ :  $150 \text{ mg.Kg}^{-1}$ ,  $C_2$ :  $300 \text{ mg.Kg}^{-1}$  et  $C_3$  :  $500 \text{ mg.Kg}^{-1}$ .

### 3.6. Contenu en caroténoïdes

Les résultats obtenus (**Figure.36**), montre que la variété Gta contient plus de caroténoïdes que Vitron dans tous les lots de l'expérimentation. Par contre, le traitement des plantes par les différentes concentrations du nitrate de plomb ( $\text{PbNO}_3$ )<sub>2</sub> a d'une part diminué la teneur des feuilles en caroténoïdes des plantes traitées par la concentration C<sub>1</sub> (150mg.Kg<sup>-1</sup> de sol) de la variété Vitron et d'autre part favorisé une élévation particulière chez la variété Gta. En effet, le plomb semble stimuler la teneur en caroténoïdes d'une façon hautement significative ( $P < 0.05$ ) pour les 3 doses appliquées par ordre de croissance C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> avec des valeurs respectives de (4.3, 4.6 et 3.43  $\mu\text{g.g}^{-1}$  de MF). Les témoins sont caractérisés par une valeur moyenne de (2.94  $\mu\text{g.g}^{-1}$  de MF).



**Figure. 36: Effets du plomb sur le contenu en pigments caroténoïdes dans les plantules issues de la germination des graines de blé dur durant 45 jours de croissance sur un substrat sol contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb. C<sub>0</sub> : 0 mg.Kg<sup>-1</sup> témoin, sans traitement, C<sub>1</sub>: 150mg.Kg<sup>-1</sup>, C<sub>2</sub>: 300mg.Kg<sup>-1</sup> et C<sub>3</sub> : 500 mg.Kg<sup>-1</sup>.**

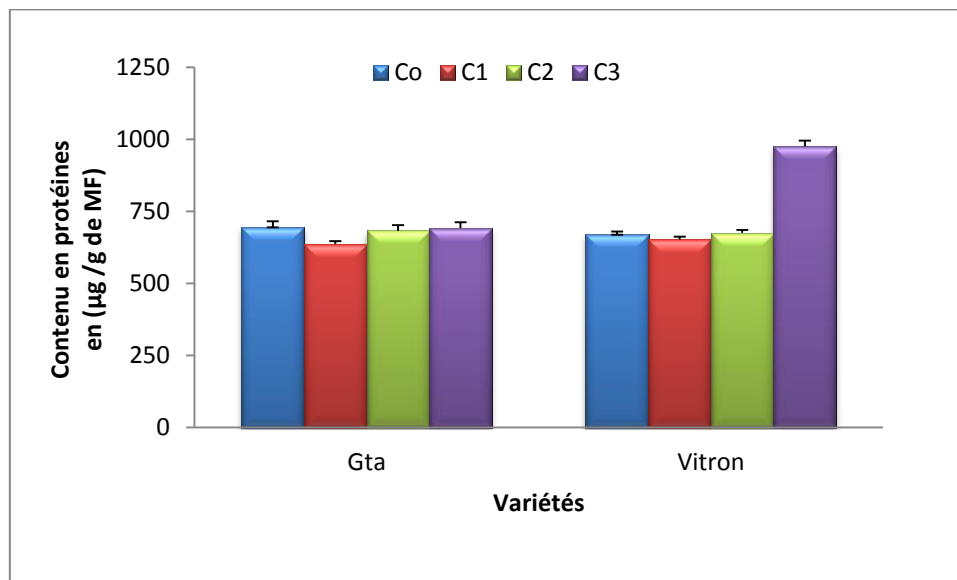
### 3.7. Contenu en protéines

L'analyse des résultats présentés dans la figure 37, montre l'existence de différences hautement significatives ( $P < 0.05$ ). En effet, que le Pb n'a pas engendré d'effet négatif sur la synthèse des protéines chez la variété Gta, notamment avec les traitements utilisées. En revanche, chez la variété Vitron, on a noté une légère stimulation du contenu en protéines chez les plantes traitées par les doses C<sub>2</sub> et C<sub>3</sub> par rapport aux témoins. Les valeurs trouvés du

contenu en protéine pour la dose ( $C_3$ :  $500\text{mg.Kg}^{-1}$  de sol) sont ( $97.56\mu\text{g.g}^{-1}$  de MF) contre ( $67.07\mu\text{g.g}^{-1}$  de MF) pour le témoin.

### 3.8. Contenu en glutathion

L'observation de la **figure 38**, montre que, la variété Gta renferme plus de glutathion que la variété Vitron. D'une manière générale, chez la variété Gta, les plantes stressées par le plomb ont réagi par l'augmentation de la quantité du glutathion synthétisé dans leurs tissus avec un pic maximal atteint avec la concentration  $C_2$  ( $0.29\mu\text{g.g}^{-1}$  de MF). En revanche, chez la variété Vitron, le plomb a stimulé légèrement la synthèse du glutathion avec le traitement  $C_2$  comme pour la première variété et causé une réduction du glutathion pour les deux autres concentrations restantes à savoir  $C_1$  et  $C_3$ , avec respectivement les valeurs ( $0.052$ ,  $0.063\mu\text{g.g}^{-1}$  de MF). L'analyse statistique des résultats (analyse de variance à 2 critères de classification) montre que ce caractère varie d'une manière très hautement significative ( $P < 0.001$ ). En conséquence, on peut dire que le stress métallique des plantes peut causer deux effets différents selon la réaction des variétés à l'agent polluant et les doses utilisées. Ainsi, donc le Pb stimule la synthèse du glutathion chez la variété Gta et l'inhibe dans la deuxième variété Vitron.



**Figure.37:** Effet du plomb sur la teneur en protéines dans les jeunes plantules issues de la germination des graines de blé dur durant 45 jours de croissance sur un substrat sol contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb.  $C_0$  :  $0\text{ mg.Kg}^{-1}$  témoin, sans traitement,  $C_1$ :  $150\text{mg.Kg}^{-1}$ ,  $C_2$ :  $300\text{mg.Kg}^{-1}$  et  $C_3$  :  $500\text{ mg.Kg}^{-1}$ .

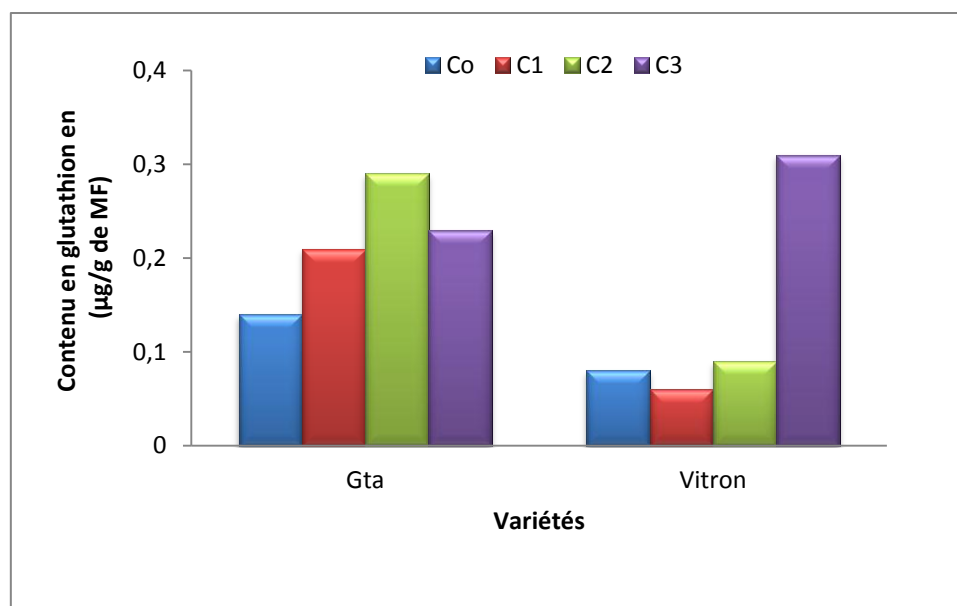
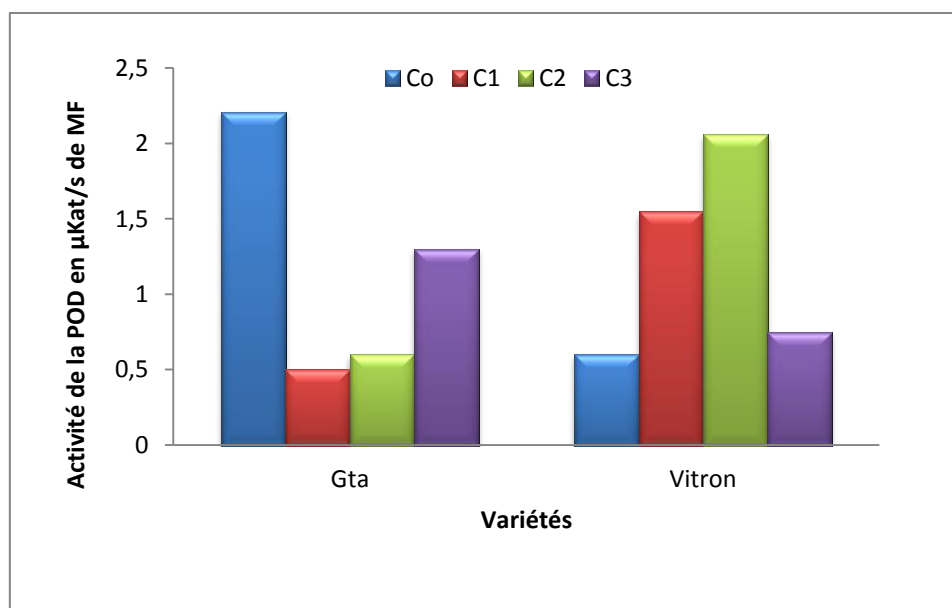


Figure.38: Effets du plomb sur le contenu en glutathion dans les jeunes plantules issues de la germination des graines de blé dur durant 45 jours de croissance sur un substrat sol contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb. C<sub>0</sub> : 0 mg.Kg<sup>-1</sup> témoin, sans traitement, C<sub>1</sub> : 150mg.Kg<sup>-1</sup>, C<sub>2</sub>: 300mg.Kg<sup>-1</sup> et C<sub>3</sub> : 500 mg.Kg<sup>-1</sup>.

### 3.9. Activité de la peroxydase (POD)

La détermination de l'activité de la peroxydase sous l'influence du plomb (**Figure.39**) a montré une réduction de cette activité peroxydasique pour les 3 concentrations (C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>) utilisées sur la variété Gta avec des valeurs respectives de (0.5, 0.6, 1.3 µKat.g<sup>-1</sup> de MF) contre (2.21µKat.g<sup>-1</sup> de MF) du témoin.

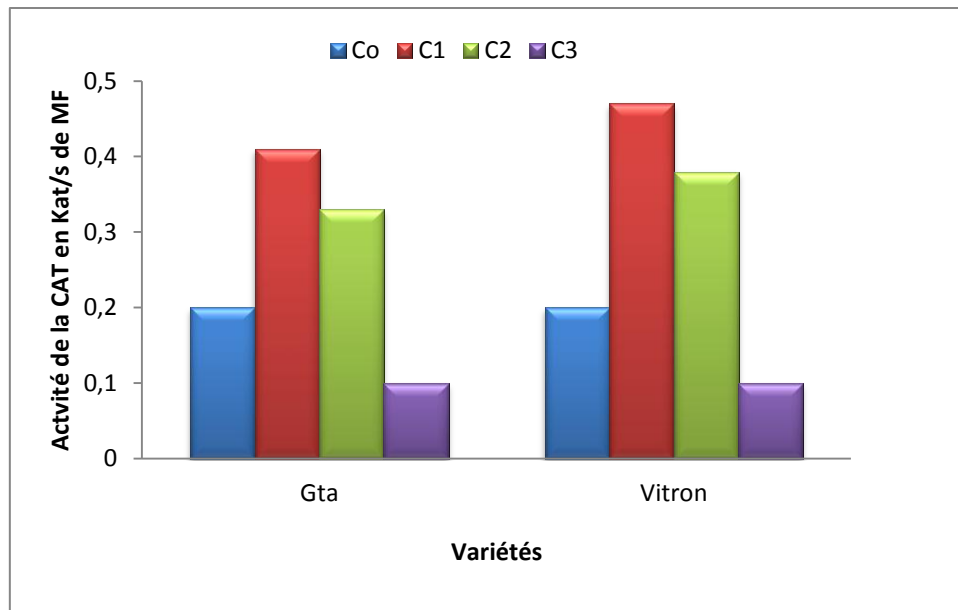
En outre, pour la variété Vitron, on a noté une augmentation de l'activité enzymatique avec respectivement, les activités (1.55, 2.06, 0.75 µKat.g<sup>-1</sup> de MF) pour les doses utilisées dans l'ordre croissant par rapport au témoin (0.6µKat.g<sup>-1</sup> de MF).



**Figure.39:** Effet du plomb sur l'activité peroxydasique dans les jeunes plantules issues de la germination des graines de blé dur durant 45 jours de croissance sur un substrat sol contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb. C<sub>0</sub>: témoin sans traitement, C<sub>1</sub>: 150mg.Kg<sup>-1</sup> de sol, C<sub>2</sub>: 300mg.Kg<sup>-1</sup> de sol et C<sub>3</sub>: 500mg.Kg<sup>-1</sup> de sol.

### 3.10. Activité de la catalase

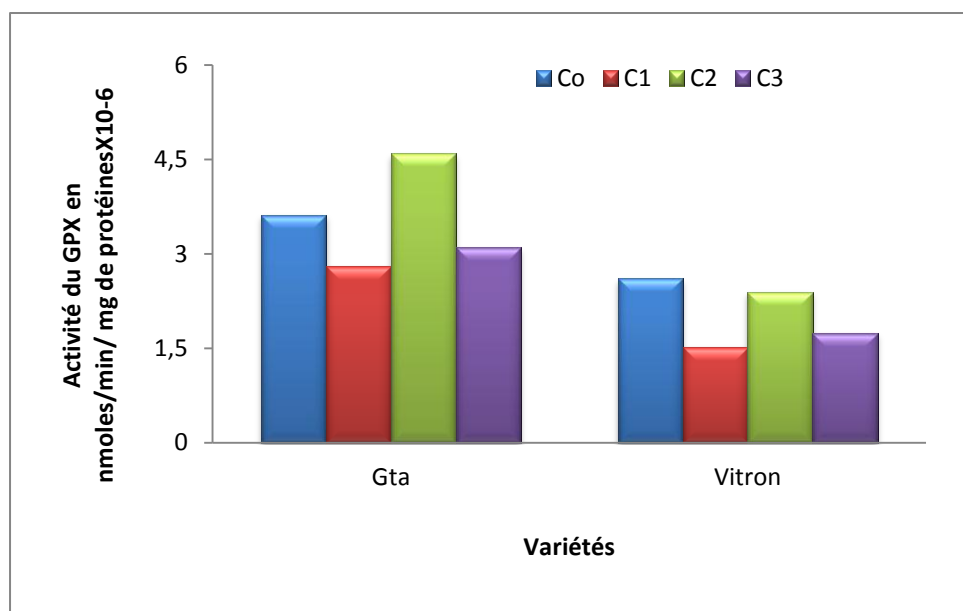
L'effet du plomb sur l'activité catalasique a été mis en évidence. Les résultats obtenus (**Figure.40**) suggèrent que le plomb utilisé dans le stress des plantes à différentes doses a induit une élévation de l'activité enzymatique de l'enzyme (CAT) responsable de la détoxification des cellules du peroxyde d'hydrogène (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), agent toxique du métabolisme cellulaire en le transformant en eau (H<sub>2</sub>O). Ce sont les doses moyennes (C<sub>2</sub> et C<sub>3</sub>) qui ont stimulé l'activité catalasique chez les deux variétés avec un léger avantage pour la variété Vitron (0.47, 0.383 µKat.g<sup>-1</sup> de MF) contre (0.41, 0.33 µKat.g<sup>-1</sup> de MF). Signalons par ailleurs que la plus forte dose (C<sub>3</sub>: 500mg.Kg<sup>-1</sup> de sol) a réduit l'activité de la catalase de presque la moitié par rapport aux témoins chez les deux variétés.



**Figure.40:** Effet du plomb sur l'activité de la catalase dans les jeunes plantules issues de la germination des graines de blé dur durant 45 jours de croissance sur un substrat sol contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb. C<sub>0</sub>: témoin sans traitement, C<sub>1</sub>: 150mg.Kg<sup>-1</sup> de sol, C<sub>2</sub>: 300mg.Kg<sup>-1</sup> de sol et C<sub>3</sub>: 500mg.Kg<sup>-1</sup> de sol.

### 3.11. Activité de gaïacol peroxydase (GPX)

L'effet du Pb sur l'activité de l'enzyme gaïacol peroxydase (GPX) a été analysé. Les résultats (**Figure.41**) montrent bien l'effet inhibitif du Pb sur l'activité de cette enzyme, principalement chez la variété Vitron. Chez la seconde variété Gta, seule la dose (C<sub>3</sub>) a provoqué la stimulation de l'activité de la GPX avec une valeur de ( $4.6.10^{-5}$  nmol.min<sup>-1</sup>mg<sup>-1</sup> de protéines). Les deux autres doses restantes, ont au contraire causé un effet dépressif de l'activité de cette enzyme, comme dans la variété Vitron.



**Figure.41:** Effet du plomb sur l'activité du gaïacol peroxydase dans les jeunes plantules issues de la germination des graines de blé dur durant 45 jours de croissance sur un substrat sol contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb. C<sub>0</sub>: témoin sans traitement, C<sub>1</sub>: 150mg.Kg<sup>-1</sup> de sol, C<sub>2</sub>: 300mg.Kg<sup>-1</sup> de sol et C<sub>3</sub>: 500mg.Kg<sup>-1</sup> de sol.

### 3.12. Activité de l'ascorbate peroxydase (APX)

L'examen des résultats (**Figure.42**) montre que d'une manière générale, le plomb a inhibé l'activité de l'ascorbate peroxydase de la variété Gta, dans tous les traitements. Par contre, chez la seconde variété Vitron, il a été constaté une stimulation notable pour toutes les doses utilisées avec une activité culminante de (0.024 nmoles/min/mg de protéines) pour la dose C<sub>2</sub> :300mg de Pb.Kg<sup>-1</sup> de sol) contre, (0.004 nmoles/min/mg de protéines) du témoin.

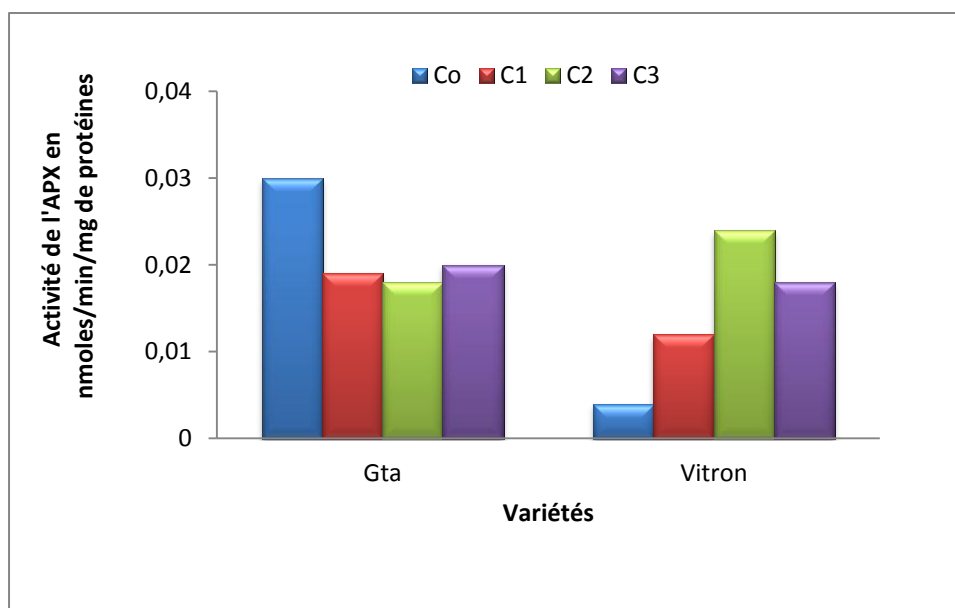
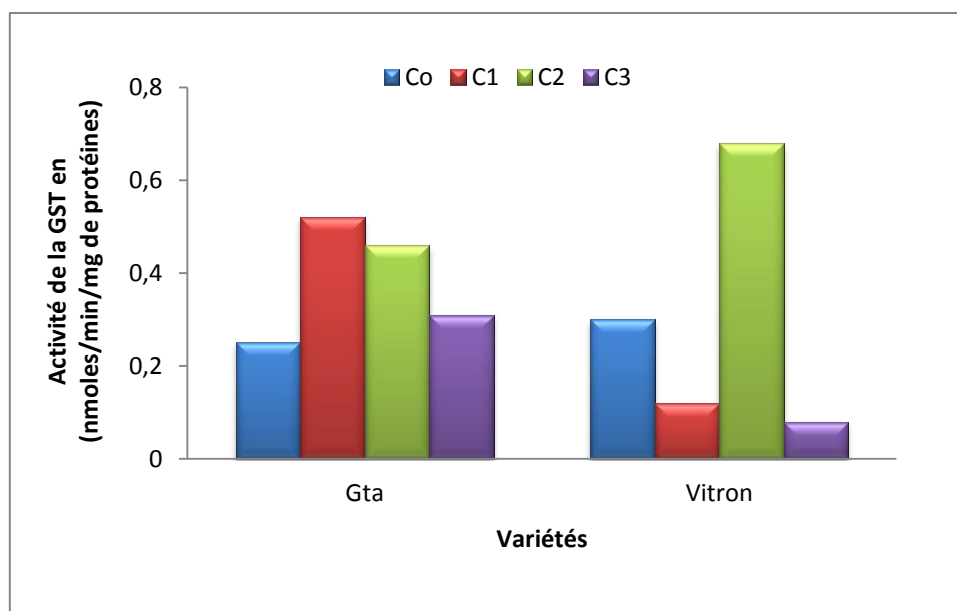


Figure. 42: Effet du plomb sur l'activité de l'ascorbate peroxydase. dans les jeunes plantules issues de la germination des graines de blé dur durant 45 jours de croissance sur un substrat sol contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb C<sub>0</sub>: témoin sans traitement, C<sub>1</sub>: 150mg.Kg<sup>-1</sup> de sol, C<sub>2</sub>: 300mg.Kg<sup>-1</sup> de sol et C<sub>3</sub>: 500mg.Kg<sup>-1</sup> de sol.

### 3.13. Activité du glutathion sulfotransférase (GST)

L'analyse des résultats (Figure.43) concernant l'activité de l'enzyme glutathion sulfotransférase (GST) montre que le plomb a réduit l'activité de cette enzyme chez la variété Vitron et élevé chez la variété Gta avec un pic maximal pour la dose (C<sub>2</sub>) de (0.68 nmoles/min/mg de protéines) par rapport au témoin (0.25 nmoles/min/mg de protéines). En conséquence, on peut dire que le Pb a joué un double rôle selon la réaction des espèces. Chez la variété Gta, le Pb a été un stimulateur de l'activité de l'enzyme glutathion sulfotransférase (GST) et pour la variété Vitron variété, il a un effet inhibiteur de l'activité enzymatique.



**Figure. 43:** Effets du plomb sur l'activité de glutathion sulfotransférase (GST) dans les jeunes plantules issues de la germination des graines de blé dur durant 45 jours de croissance sur un substrat sol contenant différentes concentrations de nitrate de Plomb.  $C_0$  : 0 mg.Kg<sup>-1</sup> témoin, sans traitement,  $C_1$ : 150mg.Kg<sup>-1</sup>,  $C_2$ : 300mg.Kg<sup>-1</sup> et  $C_3$  : 500 mg.Kg<sup>-1</sup>.

#### 4. Discussion

En guise de discussion on peut dire que le traitement des plantes par différentes concentrations en plomb  $Pb(NO_3)_2$ , nous a permis d'avoir certaines réponses du comportement des deux variétés de blé dur *Triticum durum* Desf.cv Gta et Vitron. vis à vis du stress métallique.

Les résultats obtenus lors des tests effectués pendant cette étude, ont montré pour les paramètres physiologiques, une diminution de la surface foliaire, du poids frais des feuilles, du poids spécifique des feuilles et de la teneur relative en eau des tissus du mésophylle foliaire, notamment dans la plus forte dose de traitement ( $C_3$ : 500mg de  $Pb(NO_3)_2$ . Kg<sup>-1</sup> de sol). En effet, Les chercheurs travaillant sur ce thème ont proposé plusieurs explications à ces effets observés. En premier lieu, la diminution de la croissance des feuilles (PSF) conduit à un amoindrissement de la surface foliaire (SF) qui est la zone principale de transpiration de la plante (Iqbal and Mushtaq, 1987 ; Weryszko-Chmielewska and Chwil, 2005). De nombreuses études ont mis en évidence une perturbation importante du statut hydrique des plantes traitées au plomb. Elles ont essentiellement noté une réduction de la transpiration, y compris à de faibles doses, ainsi qu'une diminution de la teneur en eau (Barcelo and Poschenrieder, 1990; Wozny *et al.*, 1995; Sayed, 1999). Au niveau des feuilles, les stomates qui jouent un rôle important dans la conductance et la régulation stomatique (ouverture/fermeture) sont réduits

chez les plantes traitées au plomb et donc, elles sont de plus petites tailles, ce qui limiterait les flux d'échanges (Weryszko-Chmielewska and Chwil, 2005). Toutefois, les plantes semblent pouvoir s'adapter à ces deux effets, en développant une plus grande densité de stomates (Khosobrukhov *et al.*, 2004; Weryszko-Chmielewska and Chwil, 2005).

D'une façon globale, le plomb limite les pertes en eau de la plante par phénomène de transpiration. Cette limitation de la transpiration, moteur principal de la circulation de la sève brute et par conséquent d'eau, conduit à une diminution de la teneur en eau des plantes. La présence d'ions  $Pb^{2+}$  entraîne une forte accumulation d'acide abscissique (ABA) dans les parties aériennes et les racines des plantes (Parys *et al.*, 1998; Atici *et al.*, 2005), induisant la fermeture des stomates (Khosobrukhov *et al.*, 2004; Weryszko-Chmielewska and Chwil, 2005). Cette fermeture limite fortement les échanges gazeux de la plante avec l'atmosphère, et par conséquent les pertes hydriques par transpiration (Parys *et al.*, 1998; Vassil *et al.*, 1998).

Concernant l'effet du plomb sur la teneur des pigments photorécepteurs, l'application de différentes concentrations a permis de mettre en évidence une action stimulatrice de la teneur des pigments chlorophylliens et également des caroténoïdes par rapport aux témoins. Ces résultats sont corroborés par des travaux cités par la littérature spécialisée et largement discuté dans la partie résultats germination (se conférer chapitre IV.4.2).

En revanche, Concernant les autres marqueurs biochimiques, contenu en protéines et en glutathion, nos résultats montrent que les deux variétés étudiées réagissent différemment au plomb. Le contenu en protéines a été augmenté chez les plantes de la variété Vitron traitées avec la plus forte dose ( $C_3$ :  $500mg.Kg^{-1}$  de sol) et des effets presque nulle par rapport aux témoins des autres concentrations. Dans l'ensemble, on peut dire que nos résultats sont en parfait accord avec ceux trouvés par Mohan and Hosetti, (1997); Saxena *et al.*, 2003; Mishra *et al.*, 2006b) qui indiquent que les métaux lourds peuvent induire des augmentations dans la teneur des protéines et glutathion avec de faibles doses et des réductions à fortes doses. En effet, le plomb comme les autres ETM quand il est présent dans le cytoplasme interagit avec les protéines. L'action du plomb sur la concentration totale en protéine n'est pas claire, bien que de fortes concentrations puissent diminuer le pool protéique, cette diminution quantitative de la teneur en protéines totales apparaît comme la résultante de plusieurs conséquences de l'action du plomb par :

- modification de l'expression génique (Kovalchuk *et al.*, 2005)
- augmentation de l'activité ribonucléasique (Jana and Choudhuri, 1982; Gopal and Rizvi, 2008)

-stimulation de l'activité protéasique (Jana and Choudhuri, 1982) ;  
-diminution de la teneur en acide aminés libres (Xiong *et al.*, 2006), corrélée à une forte perturbation du métabolisme de l'azote.

Par ailleurs, les plus faibles concentrations semblent, au contraire, augmenter la teneur en protéines totales (Mishra *et al.*, 2006b). Cette accumulation protéique, limitée aux premiers jours d'exposition, pourrait être la conséquence de la synthèse, par la plante, de protéines de défense contre ce stress métallique, avec notamment des protéines intervenant dans le maintien du statut redox de la cellule comme l'ascorbate, ou dans la séquestration du métal par le glutathion(GSH) et les phytochélatines (PC). Dans ce contexte, le traitement des plantes par le plomb, a provoqué une élévation du contenu en glutathion(GSH) chez les deux variétés quel que soit la concentration utilisée. Ceci peut être expliqué par le fait que les phytochélatines (PC) semblent jouer un rôle important dans la tolérance des plantes à ce métal et participent à sa détoxification (Gupta *et al.*, 1995; Piechalak *et al.*, 2002) et que leur synthèse peut se faire à partir du glutathion(GSH), ainsi que l'allongement de la chaîne de PC est catalysée par une enzyme, la phytochélatine synthétase ou (PCS). Cette enzyme est constitutive des cellules végétales, mais n'est active qu'en présence de certains métaux lourds, comme le plomb qui est connu pour stimuler la production de PC et activer la PCS (Cobbett and Goldsbrough, 2002; Clemens, 2006a; 2006b).

De la même façon que pour le glutathion (GSH), la complexation du plomb se fait par interaction entre les ions ( $Pb^{2+}$ ) et le groupement thiol de la cystéine. Les PC séquestreraient le plomb soluble présent dans le cytoplasme avant de le transporter dans les vacuoles (Piechalak *et al.*, 2002; Seregin *et al.*, 2002 ; Małeczka *et al.*, 2008). Bien qu'il semble que le rôle principal des PC soit de chélater certains métaux et de les transporter vers leurs lieux de séquestration (Clemens *et al.*, 2002), leurs rôles dans la détoxification de ces métaux seraient plus complexes.

L'activité des enzymes antioxydantes, est considérée comme un biomarqueur du stress oxydatif (Seregin and Ivanov, 2001; Sharma and Dubey, 2005). En ce qui concerne, l'activité enzymatique de la peroxydase (POD) de la catalase (CAT) du gaiacol peroxydase (GPX), de l'ascorbate peroxydase (APX) et du glutathion sulfotransférase (GST) ; le plomb semble provoquer des réactions contraires chez les deux variétés étudiées. Par exemple, l'activité peroxydasique a diminué chez la variété Gta et a augmenté chez la variété Vitron. Dans le cas de l'enzyme catalase, le plomb a stimulé son activité dans les deux variétés. Par

ailleurs, l'activité de glutathion sulfotransférase a subi une stimulation chez la variété Gta par rapport au témoin et de la deuxième variété.

En règle générale, les enzymes du cycle Asada-Halliwell-Foyer, les SOD et les POX sont activées, quelle que soit l'intensité du stress plombique et sa durée. Le cas de la catalase (CAT) est complexe, puisque la moitié des publications rapporte une inhibition de son activité par le plomb (Verma and Dubey, 2003; Choudhury and Panda, 2004; Seregin *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2007; Dey *et al.*, 2007; Hu *et al.*, 2007; Qureshi *et al.*, 2007; Gopal and Rizvi, 2008). L'autre moitié montre une augmentation de l'activité de cette enzyme (Malecka *et al.*, 2001; Pang *et al.*, 2002; Ruley *et al.*, 2004a; Reddy *et al.*, 2005; Mishra *et al.*, 2006b). Cette inhibition semble être uniquement dépendante de l'espèce traitée et non de l'organe étudié, de la durée et /ou de l'intensité du traitement. L'inhibition de l'activité catalasique a été constatée lors de différents stress, aussi bien chez les végétaux que chez les levures et les humains. Pour tous les organismes étudiés, cette inhibition n'est pas une règle générale. Par ailleurs, lorsque la CAT est inhibé, ce mécanisme est dose-dépendant. La CAT étant une métallo-enzyme, son inhibition pourrait être due à une interaction directe avec le plomb. En plus, dans le cas des métaux lourds, l'inhibition de la CAT est généralement corrélée à une activation de l'APX. De plus, le taux d'ascorbate (ASC) ne semble pas être régulé par un stress métallique (Landberg and Greger, 2002).

Concernant les antioxydants non enzymatiques de notre recherche (caroténoïdes, GSH), les différentes études présentent des résultats contradictoires, leur teneur étant, soit augmentée, soit diminuée suite à un traitement au plomb (Gupta *et al.*, 1995; Choudhury and Panda, 2004; Mishra *et al.*, 2006b; Qureshi *et al.*, 2007). Le faible nombre de données disponibles ne permet pas de tirer de conclusions à leur propos.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de ce travail de thèse est d'élucider les réponses phénologiques et moléculaires de deux variétés de blé dur (*Triticum durum* L.) cv Gta et Vitron en réponse à la présence d'un métal lourd, le plomb dans le milieu de culture. A l'issue, des résultats obtenus, cette étude montre que le traitement des graines de blé dur par le plomb durant la phase de germination et la croissance de jeunes plantules provoque une diminution des paramètres germinatifs (faculté germinative, allongement des coléoptiles et une réduction du nombre moyen des racelles) et de nombreux désordres métaboliques.

Concernant l'essai de croissance, les résultats obtenus tout au long de cette étude ont démontré que :

- le plomb a affecté aussi, de façon négative les paramètres physiologiques, la surface foliaire, le poids spécifique des feuilles, la teneur en eau des tissus des feuilles (relative water content en %).

- l'application de différentes concentrations de plomb, permettent toutefois de stimuler la synthèse des pigments chlorophylliens pour les deux variétés par rapport aux témoins, même constat pour les caroténoïdes qui présentent une stimulation notamment chez la variété Gta contrairement à Vitron. Il a été aussi noté que le plomb a également favorisé le taux des protéines et le contenu en glutathion chez la variété Gta par rapport à Vitron.

D'une façon générale et globale, on peut dire et avancer que les résultats de ces travaux sur la germination et la croissance sur sol, ont montré qu'à des concentrations élevées en Pb, le métabolisme cellulaire des plantes est sensiblement perturbé, traduisant vraisemblablement une cytotoxicité qui se déclenche dès les premiers stades du processus de croissance. L'inhibition de la germination, de la croissance et de certains marqueurs physiologiques est dose-dépendante.

L'absorption du plomb par les racines de jeunes plantules issues soit de la germination sur boîte de pétri, soit dans des pots sur substrat sol est suivi d'un transport dans les feuilles, et y induit un stress oxydatif. Celui-ci est révélé par une augmentation de molécules antioxydantes accompagnées par l'activation d'un grand nombre d'enzymes du système antioxydant (POX, CAT, APX, GPX, GST) impliquées dans l'élimination du

peroxyde d'hydrogène (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) qui est toxique pour les cellules végétales. Cette accumulation certaine du Pb dans les organes végétaux s'est traduite également par une biosynthèse de métabolites variés: protéines, GSH, acides aminés libres (proline) et sucres solubles. Ces molécules proviendraient certainement d'une activation des enzymes hydrolasiques ou d'une stimulation de leur voie de synthèse. La proline constitue un bon bioindicateur de stress environnemental. Sous l'effet du Pb, l'élévation de sa teneur dans les feuilles confirme bien son rôle d'osmoticum reconnu. Les sucres solubles contribueraient à l'élimination des ROS et l'osmorégulation augmentant ainsi la tolérance de la plante aux métaux lourds.

Concernant, le comportement des deux variétés étudiées cv *Gta dur* et *Vitron* vis-à-vis de ce stress métallique, il apparaît que la variété *Gta dur* est moins sensible que la variété *Vitron*.

## **Perspectives**

En perspectives, afin de préciser les mécanismes mis en jeu, un certain nombre de travaux complémentaires nous paraissent essentiel à réaliser :

-tout d'abord notre expérimentation (de la croissance) a été effectuée dans des volumes de sol réduit et sur des temps limités, une expérimentation de terrain en vraie grandeur nature doit maintenant être envisagée.

-le dosage du Pb n'a pas été réalisé faute de moyen, une analyse des teneurs en plomb dans le sol et le végétal doit être préconisée pour connaître d'une part les seuils de toxicité du Pb dans le végétal et d'autre part, la dynamique du prélèvement du sol.

-comprendre les adaptations métaboliques du *Triticum durum* soumis au Pb, est essentiel, c'est pourquoi d'autres recherches en écophysiologie classique et biologie moléculaire (génétique) doivent être réalisés afin d'optimiser les connaissances acquises.

---

**BIBLIOGRAPHIE****A**

---

- Abdelguerfi A., Laouar M., 2000**-Conséquences des changements sur les ressources génétiques du Maghreb. *Cahiers. Options. Méditerranéennes*. Ser A /N°39, 78-87.
- ADEME., 2006** - Bilan de recyclage 1996-2005. Partie 1: synthèse générale et analyse par filière. Rapport final, 340p.
- Adriano DC, 2001**- *In: Trace Metals in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals*, Springer-Verlag, New York, pp. 866 Second Ed.
- Alia., Mohanty P., Matysik J., 2001**- Effect of proline on the production of singlet oxygen. *Amino Acids*, 21, 195-200.
- Amzallag C.N., Lerner H.R., 1995**.-Physiological adaptation of plants to environmental stresses. *In: M Pressarakli (Ed).Handbook of Plant and Crop Physiology*. Marcel Dekker, New York. 557- 625.
- An Y.D., 2006**-Assessment of comparative toxicities of lead and copper using plant assay. *Chemosphere*, 62 (8):1359-1365.
- Anonyme, 1993**- Céréaliculture. Revue. Céréaliculture, n°26. Ed. I.T.G.C, Ministère de l'agriculture.
- Araus J.L., Amaro. Volta J., Nalchoul H., Nachit M.M., 1998**- Chlorophyll fluorescence as criteria for grains yield in durum wheat under Mediterranean conditions. *F.C.R.*, 55: 209-223.
- Arora A., Sairam R., Srivastav G., 2002**- Oxidative stress and antioxidative system in plants. *Current Science*, 82(10): 1227-1238.
- Arshad M., Silvestre J ., Pinelli E ., Kallerhoff J., Kaemmerer M., Tarigo A., Shahid M ., Guiresse M., Pradere P., Dumat C., 2008**- A field study of lead phytoextraction by various scented *Pelargonium* cultivars. *Chemosphere*, 71(11): 2187-2192.
- Asada K., 1994**- Production and action of active oxygen species in photosynthetic tissues. Causes of Photo oxidative Stress and Amelioration of Defense Systems in Plants. C.H. Foyer and P. M.Mullineaux. Boca Raton, CRC Press: 77-104.
- Ashraf M.Y., Azar N., Ashraf M., Hussain M., Arshad M., 2011**- Influence of lead on growth and nutriment accumulation in Canola (*Brassica napus* L.) cultivars. *J. Environ. Biol.*, 32, 659-666.

**Atici, Ouml., Aar G., Battal P., 2005-** Changes in phytohormone contents in chickpea seeds germinating under lead or zinc stress. *Biologia Plantarum*, 49: 215-222.

**B**

---

**Baaziz M., Qucif N., Bendiab K., Aouad A., 2006-** Les peroxydases des plantes. Aspects théoriques et applications pratiques. Congrès International de Biochimie, Agadir 2006, 17-21.

**Babiche H., Stotzky G., 1980-** Environmental factors that influence the toxicity of heavymetals and gaseous pollutants to microorganisms, *Crit. Rev. Microbiol*, 8, 99-145.

**Baier M Dietz K.J., 1997** -The plant 2-Cys peroxiredoxin BAS1 is a nuclear-encoded chloroplast protein: its expressional regulation, phylogenetic origin, and implications for its specific physiological function in plants. *The Plant Journal* 12(1): 179-190.

**Baize D., 1997-** Teneurs totales en ETM dans les sols (France).INRA. Ed. Paris, 408p.

**Baker A.J.M., Walker P.L., 1989-** Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants. In: Heavy metal tolerance in plants - Evolutionary aspects. Shaw, A. (Eds). CRC Press, 155-177.

**Barcelo J., Poschenrieder C ., 1990** - Plant water relations and affected by heavy metal stress: A review. *Journal of Plant Nutrition*, No 1, Issue 13(1): 1-37.

**Baszinsky T., Wajao L., Krol M., Wolinska D., Krupa Z., Tukendorf A., 1980** - Photosynthetic activities of cadmium. Treated tomato plants. *Physiologia Plantarum*, 48: 365-370.

**Bates L.S., Waldren R.P., Teare I.D., 1973-** Rapid determination of the free proline for water stress studies. *Plant Soil*, 39, 205-207.

**Bazzaz F.A., Carlson R.W., Rolfe G.L., 1975-** Inhibition of Corm and Sunflower Photosynthesis by Lead. *Physiologia Plantarum*, 34(4): 326-329.

**Bedrani S., Chehat F., Ababasa S., 2001-**L'agriculture algérienne en 2000. Une révolution tranquille, le PNDA .Prospectives agricoles, 2001, 1,7-51.

**Belaid D., 1996-** Aspects de la céréaliculture algérienne. INES. D'Agronomie. Batna.187p.

**Belaid A., Moussaoui M., 1999** - Le blé dur dans le monde: production, commerce et effets attendues dans des récents changements économiques. Séminaire Régional sur l'Amélioration Des Blés dur dans les Régions Arides de l'Asie de l'Ouest et de l'Afrique du Nord. WANA, Alger du 27 au 29 Novembre 1990. 20p.

- Bensmaïa Z., 1998**-La gamme variétale des blés durs et des blés tendres. Séminaire Régional Sur la Production de Semences ‘Semences.....Demain’, OAI/DSAP Batna1-2/12/1998.
- Biernak A.E., Liwski S., Pawlak L., 1985**- Effect of the petrochemistry and refinery industry on contamination of soil and plants with trace elements. Ann. Warsaw. Agric. Univ, S.G.G.V.A.R, Land recleur, 21, pp: 9-13.
- Bittel J., Miller R.J., Koeppe D.E., 1974**- Sorption of heavy metal cations by corn mitochondria and the effects on electron and energy transfer reactions. *Physiol. Plant*, 30: 187.
- Bliefert C., Perraut R., 2001**-Chimie de l’environnement : air eau sols, déchets. Ed. De Boeck Université, pp: 381-386.
- Blokhina O., Virolainen E., Fagerstedt K.V., 2003**-Antioxydants, Oxidative Damage and Oxygen Deprivation Stress: a Review. *Annals of Botany*, 91(2): 179-194.
- Bonjean., Picard E., 1990**- Les céréales à paille origine, historique, économie et sélection. Ed. Nathan, p 235p.
- Boray E., 1991**- Les effets des polluants atmosphériques sur les végétaux. Symposium. Problème de l’environnement et de l’agriculture. Berne, Suisse.
- Boudelaa M., 2007**-Evaluation d’un germoplasme de Graminées fourragères dans la région d’Annaba. Approche biologique, agronomique et biochimique. Thèse de Doctorat d’état en biologie végétale. Université Badji Mokhtar, Annaba, 154p.
- Bourelrier P., Berthelin J., 1998**- Contamination des sols par les éléments traces: les risques et leur gestion. Rapport de l’académie des sciences. Ed. Lavoisier, Paris. 42p.
- Bradford M.M., 1976**- A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of Protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal. Biochem.*, 72, 248-254.
- Bradford K.J., 1995**- Water relation in seed germination. In: *J Kigel, G Galili (Eds). Seed Development and Germination*. Marcel Dekker, New York, 351-395.
- Burzynski M., 1987**- The influence of lead and cadmium on the absorption and distribution of potassium, calcium, magnesium and iron in cucumber seedlings. *Acta Physiologica Plantarum*, 9: 229-238.
-

## C

**Campion C., Compion D., 1995**-Introduction : la naissance de la plante. *Biotechnologies végétales* n°20, pp: 26-32.

**Carlson, R.W., Bezzaz F.A., 1977**- Growth reduction in American sycamore (*Platanus occidentalis* L.) caused by Pb, Cd interaction. *Environ. Pollut.*, 12: 243-253.

**Cauderon Y., 1979**-Etude des relations phylogénétiques chez le blé: cytogénétique et biochimique. Journées d'études: biochimie et génétique du blé .I.N.R.A ; Paris. pp: 30-33.

**Cecchi M., 2008**- Devenir du plomb dans le système sol-plante : Cas d'un sol contaminé par une usine de recyclage du plomb et de deux plantes potagères (Fève et Tomate).Thèse de Doctorat d'Université.

**Chaignon, V., 2001**- Biodisponibilité du cuivre dans la rhizosphère de différentes plantes cultivées .Cas de sols viticoles contaminés par des fongicides. Thèse : Ecole doctorale, Sciences de l'Environnement : Système Terre, Université d'Aix-Marseille, 183p.

**Chatterjee C., Dube B.K., Sinha P., Srivastava P., 2004**- Detrimental effects of lead phytotoxicity on growth yield and metabolism of rice. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 35, 255-265.

**Chen X.Y., He. X.F., Luo X.M., Yu Y.L., Lino Q., Wong H.H., 2002**- Physiological mechanism of plant roots exposed to Cadmium. *Www.paper.educ.cn. Elsevier. Science; Ltd*, pp: 789-793.

**Chen Z., Gallie D.R., 2004**- The Ascorbic Acid Redox State Controls Guard Cell Signaling and Stomatal Movement. *Plant Cell*, 16(5): 1143-1162.

**Chen JZhu., C., Li L.P., Sun Z.Y., Pan X.B., 2007**- Effects of exogenous salicylic acid on growth and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> - metabolizing enzymes in rice seedlings under lead stress. *Journal of Environmental Sciences*, 19(1): 44-49.

**Choudhury S., Panda S.K., 2004**-Induction of oxidative stress and ultrastructural changes in moss *Taxithelium nepalense* (Schwaegr.) Broth under lead and arsenic phytotoxicity. *Current Science*, 87(3): 342-348.

**Clemens S., Palmgren M.G., Kramer U., 2002**- A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends in Plant Science*, 7(7): 309-315.

**Clemens S., 2006a**- Evolution and function of phytochelatase synthases. *Journal of Plant Physiology*, 163(3): 319-332.

**Clemens S., 2006b-** Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochemistry*, 88(11): 1707-1719.

**Clijsters H., Van asshe F., 1985-** Inhibition of photosynthesis by heavy metals, *Photosynthesis Research*, 7: 31-40.

**CNCC, 1998-** Les variétés de céréales autorisées à la production et la commercialisation. J.O.66.

**CNCC, 1999-** Classement variétal en fonction de la superficie emblavée en semences (céréales) pour les campagnes 1994/1995 à 1997/98.

**Cobb G.P., Waters K., Wixson M., Dorward B.G., King E., 2000-** Accumulation of heavy metals by vegetables grown in mine wastes. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 19, 600-607.

**Cobbett C., Goldsbrough P., 2002-** Phytochelatins and metallothioneins: Roles in Heavy Metal Detoxification and Homeostasis. *Annual Review of Plant Biology*, 53(1): 159-182.

## D

---

**Dalenberg J.W., Van Driel W., 1990-** Contribution of atmospheric deposition to heavy-metal concentrations in field crops. *Netherlands journal of agricultural science* 38: 369-379.

**Dagnelie P., 1998-** Statistique théorique et appliquée. Tome 2 : inférence statistique à une et à deux dimensions. Bruxelles. Université de Gembloux. Ed. De Boeck et Lancier, 659 p.

**Dazy M. 2008.,** Caractéristique de la colonisation spontanée par les plantes des sols pollués- rôles des systèmes cellulaires de détoxification. Thèse de Doctorat. Université de METZ-UFR des Sciences fondamentales et appliquées. Option toxicologie de l'environnement, 261p.

**De Abreu C.A., De Abreu M.F., Andrade J.C., 1998-** Distribution of lead in the soil profile, evaluation by DTPA and Mehlich.3.solutions. *Bragantia*, 57: 185-882.

**De Marco, A., Guzzardi, P., Jamet, E., 1999-** Isolation of Tobacco isoperoxidases accumulated in cell suspension culture medium and characterization of activities related to cell wall metabolism. *Plant Physiol*, 120, 371-382.

**Demmig-Adams B., Adams W.W., 1996-** The role of xanthophyll cycle carotenoids in the protection of photosynthesis. *Trends in Plant Science*, 1(1): 21-26.

**Deutsch J.C., 1997-** Ascorbic Acid and Dehydroascorbic Acid Interconversion without Net Oxidation or Reduction. *Analytical Biochemistry*, 247(1): 58-62.

**Deutsch J.C., 2000-** Dehydroascorbic acid. *Journal of Chromatography, A* 881(1-2): 299-307.

**Dey S.K, Dey J ., Patra S., Pothal D., 2007-** Changes in the antioxidative enzyme activities and lipid peroxidation in wheat seedlings exposed to cadmium and lead stress. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 19: 53-60.

**Drazkiewicz M., 1994-** Chlorophyll-occurrence, functions, mechanism of action, effects of internal and external factors. *Photosynthetica*, 30: 321-331.

**Ducellier L., 1930-**Espèces et variétés de céréales cultivées en Algérie. Direction de l'Agriculture de la Colonisation.

## E

---

**Elmsly J., 2001-** Nature's Building Blocks. An A-Z guide to the elements. Oxford University Press. Oxford, UK.

**Ernst. W.H.O., Veklej J.A.C., Schat H., 1992-**Metal tolerance in plants.*Acta. Bota.Neerl*, Vol 41, 229-248.

**Erroux J.SD., 1960-** Les blés des oasis sahariennes. Univ d'Alger-Inst. Rech. Saharienne. Mémoire7.1-179

**Eun S.O.,Youn H.S., Lee Y., 2000-** Lead disturbs microtubule organization in the root meristem of *Zea mays*. *Plant Physiol*, 110: 357-3

## F

---

**Fargo M.E., Mullen W.A., 1979-** Plants which accumulate metals. Part IV. A possible copper-proline complex from the roots of *Armeria maritima*. *Inorg. Chim. Acta*, 32, L93-L94.

**Foy C.D., R.L. Chaney., White M.C., 1978-** The Physiology of Metal Toxicity in Plants. *Annual. Review of Plant Physiology*, 29(1): 511-566.

**Foyer G.H., Noctor G., 2000-** Oxygen processing in photosynthesis: regulation and signaling. *New phytologist*, 146, 359-388.

**Foyer C.H., Noctor G., 2000-** Tansley Review No. 112. Oxygen processing in photosynthesis: regulation and signaling. *New Phytologist*, 146(3): 359-388.

**Foyer C.H., Theodoulou F.L., Delrot S., 2001-** The functions of inter- and intracellular glutathione transport systems in plants. *Trends in Plant Science*, 6(10): 486-492.

**Foyer C.H., Noctor G., 2003-** Redox sensing and signaling associated with reactive oxygen in chloroplasts, peroxisomes and mitochondria. *Physiologia Plantarum*, 119: 355-364.

**Foyer C.H., Noctor G., 2005a-** Oxidant and antioxidant signaling in plants: a re-evaluation of the concept of oxidative stress in a physiological context. *Plant, Cell and Environment*, 28: 1056-1071.

**Foyer C.H., Noctor G., 2005b-** Redox Homeostasis and Antioxidant Signaling: A Metabolic Interface between Stress Perception and Physiological Responses. *Plant Cell*, 17(7): 1866- 1875.

**Feillet P., 2000-** Le grain de blé, composition et utilisation. Ed INRA. Paris. pp: 74-125.

## G

---

**Garland C., Wilkins D., 1981-** Effect of Calcium on the Uptake and Toxicity of Lead in *Hordeum vulgare* L. and *Festuca ovina* L. *New Phytologist*, 87(3): 581-593.

**Gate P., 1987-** Détermination des stades de développement des céréales à paille Ser.Ed. Stat. ITCF 02058. 1-10.

**Gate P., 1995-** Ecophysiologie du blé : de la plante à la culture. Ed Lavoisier.429p.

**Glater R.A.B., Hernandez L. Jr., 1972-** Lead detection in living plant tissue using a new histochemical method. *J. Air Pollut. Control Assoc*, Vol, 22(6): 463-467.

**Gasser., 1977-** Les eaux résiduaires industrielles. 2<sup>ème</sup>Ed. Masson entièrement. Refond. 784p.

**Godin P. M., Feinberg., M.H., Ducauze, C.J., 1985-** Modelling of soil contamination by airborne lead and cadmium around several emission sources. *Environ. Pollut*, 10, 97-114.

**Godon J., William P., 1991-** Les industries de premières transformation des céréales. Coll. Agro-alimentaire. Lavoisier, pp77-91.

**Godzik B., 1993-** Heavy metal contents in plants from zinc dumps and reference area. *Polish Botanical Studies*, 5: 113-132.

**Gopal R., Rizvi A.H., 2008 -** Excess lead alters growth, metabolism and translocation of certain nutrient in radish. *Chemosphere*, 70(9): 1539-1544.

**Grill E., Loffler S., Winnacker E.L., Zenk M.H., 1989-** Phytochelatins, the Heavy-Metal-Binding Peptides of Plants, are synthesized from Glutathione by a Specific gamma-glutamylcysteine Dipeptidyl Transpeptidase (Phytochelatase). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 86(18): 6838-6842.

**Gupta M., Rai U.N., Tripathi R.D., Chandra P., 1995-** Lead induced changes in glutathione and phytochelatase in *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle. *Chemosphere*, 30(10): 2011-2020.

**Gyuris J., Golemis E., Chertkov H., Bren R.T., 1993-** Cdi1, a human G1 and S phase protein phosphatase that associates with Cdk2. *Cell*, 75(4): 791-803.

## H

---

**Halliwell B., Whiteman M., 2004-** Measuring reactive species and oxidative damage in vivo and in cell culture: how should you do it and what do the results mean?" *Brazilian Journal of Pharmacology*, 142 (2): 231-255.

**Halliwell B., 2006-** Reactive Species and Antioxidants. Redox Biology Is a Fundamental Theme of Aerobic Life. *Plant Physiology*, 141(2): 312-322.

**Hammett F.S., 1928-** Studies in the biology of metals. *Protoplasma*, 5(1): 535-542.

**Heber U., Miyake C., Mano J., Ohno C., Asada K., 1996-** Monodéhydroascorbate Radical Detected by Electron Paramagnetic Resonance Spectrometry Is a Sensitive Probe of Oxidative Stress in Intact Leaves. *Plant Cell and Physiology*, 37(8): 1066-1072.

**Heller R., 1990-** Physiologie végétale. Tome 2: croissance et développement, Ed Masson, 266p.

**Heller R., 2000-** Physiologie végétale. Tome II : Développement. 6<sup>ème</sup> Edition de l'abrégé pp: 250-260.

**Herschbach C., Rennenberg H., 1991-** Influence of Glutathione (GSH) on Sulphate Influx, Xylem Loading and Exudation in Excised Tobacco Roots. *Journal of Experimental Botany*, 42(8): 1021-1029.

**Hiner A., Ruiz J., Lopez J.N., Arnao M.B., Raven E.I., Canovas F.G. et Ascota M., 2002-** Kinetic study of the ascorbate-peroxidase by hydrogen peroxide. *Biochem.J.*, 348: 321-328.

**Hiscox J.D., Israelsam G. F., 1979-** A method for extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Can. J. Bot.*, 57, 1332-1334.

**Hong F.S., 2003-** Study of the effect of Pb<sup>2+</sup> on  $\alpha$ -amylase activity by spectroscopy. *Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi*, 23, 583-586.

**Horemans N., Foyer C. H., Potters G., Asard H., 2000-** Ascorbate function and associated transport systems in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 38(7-8): 531-540.

**Hu J Shi., G ., Xu Q., Wang X., Yuan Q., Du K ., 2007-** Effects of Pb<sup>2+</sup> on the active oxygenscavenging enzyme activities and ultrastructure in *Potamogeton crispus* leaves. *Russian Journal of Plant Physiology*, 54(3): 414-419.

## I

---

**Inzé D., Van Montagu M., 1995-** Oxidative stress in plants. *Curr.Opi.Biotech*, 6, 153-158.

**Iqbal JMushtaq S., 1987-** Effect of lead on germination, early seedling growth, soluble protein and acid phosphatase content in *Zea mays*. *Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research*, 30(11): 853-856.

**Irfan Qureshi M., Israr M., Abdin M.Z., Iqbal J., 2005-** Responses of *Artemisia annua* L. to lead and salt induced oxidative stress. *Environmental and Experimental Botany*, 53 (2): 185-193.

**Islam E., Yang X.Y ., Li T., L i D., Jin X., Meng F., 2007-** Effect of Pb toxicity on root morphology, physiology and ultrastructure in the two ecotypes of *Elsholzia argyi*. *Journal of Hazardous Materiels*, 147(3): 806-816.

## J

---

**Jana S. Choudhuri M., 1982-** Senescence in submerged aquatic angiosperms: effects of heavy metals. *New Phytologist*, 90(3): 477-484.

**Jarvis M.D., Leung D.W.M., 2001-** Chelated lead transport in *Chamaecytisus proliferus* (L.f.) link ssp. *proliferus* var. *palmensis* (H. Christ): an ultrastructural study. *Plant Science*, 161(3): 433-441.

**Just C., Chassin P., Gomez A., Linères M., Mocquot B., 1995-** Les micropolluants métalliques dans les boues résiduelles de stations d'épuration urbaines .In I –ADEME, ed, Collection Valorisation agricole des boues d'épuration. I. Kimber.

---

**K**

---

**Kabata-Pendias A., Pendias H., 1992**-Trace elements in soil and plants. CRC Press, Boca Raton, Florida. 2<sup>nd</sup> Edition, 209p

**Kacabova P., Natr., 1986** - Effect of lead on growth characteristics and chlorophyll content in barley seedlings. *Photosynthetica*, 20(4): 411-417.

**Kar M., Feierabend J., 1984** - Metabolism of activated oxygen in detached wheat and rye leaves and its relevance to the initiation of senescence. *Planta*, 160: 385-391.

**Khan D., Frankland B., 1983**- Effects of cadmium and lead on radish plants with particular reference to movement of metals through soil profile and plant. *Plant and Soil*, 70(3): 335-345.

**Koeppel D.E., Miller R J., 1970**- Lead effect on corn mitochondrial respiration. *Science*, 187, pp: 1375-1376.

**Kosobrukhov A., Knyazeva I., Mudrik V., 2004**.- *Plantago major* plants responses to increase content of lead in soils: growth and photosynthesis. *Plant Growth Regul*, 42, 145-151.

**Kovalchuk I., Titov V., Hohn B., Kovalchuk O., 2005**- Transcriptome profiling reveals similarities and differences in plant responses to cadmium and lead. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 570(2): 149-161.

**Kozłowski R., Kozłowska J., Grabowska L., Mankowski J., Szpakowska B., 2003**- Métaux lourds dans l'environnement: menaces et possibilités de riposte. Institut des Fibres Naturelles, Poznan, Pologne, 1-14.

**Krupa Z., Bazynski T., 1995**- Some aspects of heavy metals toxicity towards photosynthetic apparatus - direct and indirect effects on light and dark reactions. *Acta Physiol. Plant.*, 17, 177-190.

**Kupper H., Kupper F., Spiller M., 1996**- Environmental relevance of heavy metal substituted chlorophylls using the example of water plants. *Journal of Experimental Botany*, 47: 259-266.

**L**

---

**Lacourcelle L., 1994**-Propriétés de plomb. Revue N° 25. La fiche, 66.

- Lamhamdi M., Bakrim A., Aarab A., Lafont R., Sayah F., 2010-** A comparison of lead toxicity using physiological and enzymatic parameters on spinach (*Spinacia oleracea* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) growth. *Moroccan J. Biol.*, 6-7, 64-73.
- Lamhamdi M., Bakrim A., Aarab A., Lafont R., Sayah F., 2011-** Lead phytotoxicity on Wheat (*Triticum aestivum* L.) seed germination and seedlings growth. *C. R. Biologies*, 334, 118-126.
- Landberg T., Greger M., 2002-** Differences in oxidative stress in heavy metal resistant and sensitive clones of *Salix viminalis*. *Journal of Plant Physiology*, 159(1): 69-75.
- Lane S.D., Martin E.S., Garrod J.F., 1978-** Lead toxicity effects on indole-3-ylacetic acid-induced cell elongation. *Planta*, 144(1): 79-84.
- Lappartient A.G., Touraine B., 1996-** Demand-Driven Control of Root ATP Sulfurylase Activity and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> Uptake in Intact Canola (The Role of Phloem-Translocated Glutathione). *Plant Physiology*, 111(1): 147-157.
- Lauwerys R., 1992-**Toxicologie industrielle et intoxications professionnelles: les substances inorganiques et organométalliques. Ed Masson, pp: 198-230.
- Lee K.C., Cunningham B.A., Chung K.H., Saulsen G.M., Liang. G.H., 1976-**Lead effects on several enzymes and nitrogenous compounds in soybean leaf. *J.Environ.Quality*, 5, 4: 357-359.
- Lin J.L., Yu H.H., 1999-** Chelation therapy for patients with elevated body lead burden and progressive renal. Insufficiency: a randomized, controlled trial. *Annals of Internal Medicine*, 130: 7-13.
- Liszkay A., Kenk B., Schopfer P., 2003 -** Evidence for the involvement of cell wall peroxidase in the generation of hydroxyl radicals mediating extension growth. *Planta*, 217(4): 658-667.
- Liu D., Jiang W., Liu C., Xin C., Hou W., 2000-** Uptake and accumulation of lead by roots, hypocotyls and shoots of Indian mustard *Brassica juncea* (L). *Bioresource Technology*, 71(3): 273-277.
- Liu J., Li K., Xu J., Zhang Z., Ma T., Lu X., Yang J., Zhu Q., 2003-**Lead toxicity uptake and translocation in different rice cultivars. *Plant Science*, 165:793-802.
- Liu H., Probst A., Liao B., 2005-** Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China). *Sci. Total Environ*, 339: 153-166.

**Ljiljana V., Rudolf K., Dragan R., 1995**-Effect on heavy metals on isoenzyme polymorphism in wheat. Proceedings for natural science, Maticasrpska, Novisad, 89, 37-43.

**Loue A., 1993**- Oligo-éléments en agriculture. Edition Nathan,577p.

**Luskanov N., Ivanova T., 1994**- Guide des travaux pratiques de Biochimie. I.S.T.A, Plovdiv, Bulgarie.

## M

---

**Maier R., 1978 a** – Aktivität und multiple Formen der peroxidase in unverbleiten und verbleiten planzen von *Zea mays* L. Und *Medicagosativa*. Phytion, 19, 83-96.

**Maier R., 1978 b** –Untersuchangen zur wirkung von sleiand die sause phosphatase in *Zea mays* L. Zeitschrift für pflanzenphysiologie, 87: 347- 354.

**Malecka A., Piechalak A., Morkunas I., Tomaszewska B., 2008**- Accumulation of lead in root cells of *Pisum sativum*. *Acta Physiologiae Plantarum*.

**Malkowski E.K., Galas W., Karez W., Kuperberg J.M., 2002**. Lead distribution in corn seedlings (*Zea mays* L.) and its effects on growth and the concentration of potassium and calcium. *Plant Growth Regulation*, 3: 69-76.

**Malone C., Koeppel D.E., Miller R.J., 1974**- Localization of Lead Accumulated by Corn Plants. *Plant Physiology*, 53(3): 388-394.

**Marrs K.A., 1996**- The functions and regulation of glutathione S-transferases in plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 47(1): 127-158.

**May M., Vernoux T., Leaver C., Van Montagu M., Inze D., 1998**- Review article. Glutathione homeostasis in plants: implications for environmental sensing and plant development. *Journal of Experimental Botany*, 49(321): 649-667.

**Mazliak P., 1998** ; physiologie végétale ; croissance et développement Ed. Hermann. 150p.

**Mehlhorn H., Lelandais M., Korth H.G., Foyer C.H., 1996**- Ascorbate is the natural substrate for plant peroxidases. *FEBS Letters*, 378(3): 203-206.

**Mehra R.K., Kodati V.R., Abdullah R., 1995**- Chain Length-Dependent Pb (II)-Coordination in Phytochelatins. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 215(2): 730-736.

**Mesmar M.N., Jaber K., 1991**- The toxic effect of lead on seed germination, growth, chlorophyll and protein contents of wheat and lens. *Acta Biol. Hung.*, 42, 331-344.

- Mehta S.K., Gaur J.P., 1999-** Heavy metals induced proline accumulation and its role in ameliorating metal toxicity in *Chlorella vulgaris*. *New. Phytol.*, 143, 253-259.
- Mihoub A., Chaoui A., El T Ferjan E.I., 2005-** Changements biochimiques induit par le cadmium et le cuivre au cours de la germination des graines de petit pois (*Pisum sativum* L.). *C. R. Biologies.*, 328, 33-41.
- Mika A., Minibayeva F., Beckett R., Lüthje S., 2004-**Possible functions of extracellular Peroxidases in stress-induced generation and detoxification of active oxygen species. *Phytochemistry Reviews*, 3(1): 173.-193.
- Miles C.D., Brandle J.R., Daniel D.J., Chuder O., Schnare P.O., Uhlick D.J., 1972-** Inhibition of photosystem II in isolated chloroplasts by lead. *Plant.Physiol*, 49, 820-832.
- Miller N.J., Sampson J., Candeias L.P., Bramley P.M., Rice-Evans C.A., 1996-** Antioxidant activities of carotenes and xanthophylls. *FEBS Letters*, 384(3): 240-242.
- Minitab reference manual, release 12.21 for windows (1998)** P.A. state college, Minitab, 1047 p.
- Mishra A.A., Choudhuri M.A., 1998-** Amelioration of lead and mercury effects on germination and rice seedling growth by antioxidants. *Biologia Plantarum*, 41(3), 469-473.
- Mishra S., Srivastava S., Tripathi R.D., Kumar R., Seth C.S., Gupta D.K ., 2006-** Lead detoxification by coontail (*Ceratophyllum demersum* L.) involves induction of phytochelatins and antioxidant system in response to its accumulation. *Chemosphere*, 65(6): 1027-1039.
- Mittler R., Vanderauwera M., Gallery F., Breusegem M., 2004-** Reactive oxygen network of plants. *Trends Plant Sci.*, 9, 490-498.
- Mohan B.S., Hosetti B.B., 1997-** Potential phytotoxicity of lead, cadmium to *Lemna minor* grown in sewage stabilization ponds. *Environmental pollution*, 98(2): 233-238.
- Mokriyevich M., 1973-**Effects of lead on plant development translated. *Agrokimy*, 1, pp: 107-111.
- Moreno-Casseles J., Moraln R., Perez Espinosa A., Peres Murcia M.D., 2000-** Cadmium accumulation and distribution in Cucumber plant. *J. Plant Nutr.* 23, 243-250.
- Morlot M., 1996-** AGHTM. Aspects analytiques du plomb dans l'environnement. Ed. Lavoisier TEC et DOC.
- Morot-Gaudry J.F., 1997-**Assimilation de l'azote chez les plantes. Aspect

physiologique, biochimique et moléculaire. Ed. INRA.1-25.

**Mozzo M., Dall-Osto L., Hienerwadel R., Bassi R., Croce R., 2008-** Photoprotection in the Antenna Complexes of Photosystem II: Role of individual xanthophylls in chlorophyll triplet quenching. *Journal of Biological Chemistry*, 283(10): 6184-6192.

## N

---

**Nakano Y., Asada K., 1981-** Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant Cell Physiol*, 22: 867-880

**Navas P., Villalba J., Córdoba F., 1994-** Ascorbate function at the plasma membrane. *Biochimica and Biophysica Acta*, (BBA) - Reviews on Biomembranes, 1197(1): 1-13.

**Noctor G., Arisi A., Jouanin L., Kunert K., Rennenberg H., Foyer C., 1998-** Review article. Glutathione: biosynthesis, metabolism and relationship to stress tolerance explored in Transformed plants. *Journal of Experimental Botany*, 49(321): 623-647.

**Noctor G., Foyer C.H., 1998-** Ascorbate and glutathione: Keeping active oxygen under control. *Annu.Rev.Plant Physiol.Plant Molecular Biol*, 49, 249-279.

**Noctor G., 2006-** Metabolic signaling in defence and stress: the central roles of soluble Redox couples. *Plant, Cell and Environment*, 29: 409-425.

**Nriagu J., 1990-** Global Metal Pollution: Poisoning the Biosphere and Environment *ENVSTAR*, 32(7): 7-33.

## O

---

**Oubrouchiva N.V., Bystrova E.I., Ivanov V.B., Antipova O.V., Seregin I.V., 1998-** Root growth responses to lead in young maize seedlings. *Plant and Soil*, 200: 51-61.

**Ozenda P., 2000-** Les végétaux: Organisation et diversité biologique. 2<sup>ème</sup> édition. Ed. Dunod, 516p.

## P

---

**Padjama K., Prasad D.P.K., Prasad A.R.K., 1990-** Inhibition of chlorophyll synthesis in *Phaseolus vulgaris* L. seedlings by cadmium acetate. *Photosynthetica*, 24, 399-405.

**Pais I., Benton Jones J., 2000-** The Hand book of trace Elements. Boca Raton, FL, ST. Lucie Press. 223p.

**Paivoke A.E.A., 2002-** Soil lead alters phytase activity and mineral nutrient balance of

- 
- Pisum sativum*. *Environmental and Experimental Botany*, 48(1): 61-73.
- Palozza P., Krinsky N.I., 1992-** Astaxanthin and canthaxanthin are potent antioxidants in a membrane model. *Arch. Biochem. Biophys*, 29, 291-295.
- Pang X., Wang D.H. , Xing X.Y. , Peng A., Zhang F.S., Li C.J., 2002-** Effect of La<sup>3+</sup> on the activities of antioxidant enzymes in wheat seedlings under lead stress in solution culture. *Chemosphere*, 47(10): 1033-1039.
- Paradiso A., Berardino R., de Pinto M.C., Sanita di Toppi L., Storelli M.M., Tommasi F., de Gara L., 2008-** Increase in ascorbic-glutathione metabolism as local and precious systemic responses induced by cadmium in durum wheat plants. *Plant CellPhysiol*, 49, 362-374.
- Patra M., Bhowmick 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 mechanism in maize (*Zea may* L). *Planta*, 196:788-795.
- Parys E., Romanowska E., Siedlecka M., Poskuta J.W., 1998-** The effects of lead on photosynthesis and respiration in detached leaves and mesophyll protoplasts of *Pisum sativum*. *Acta.physiologia. Plantarum*, 20: 313-322.
- Perrin J., Wilmotte F., 1975-** Plomb et alliage de plomb. Techniques de l'ingénieur. Volume 2, Forme 510.
- Pichard A., 2002-**Plomb et ses dérivés. Fiche INERIS.
- Piechalak A., Tomaszewska B., Baralkiewicz D., Malecka A., 2002-** Accumulation and detoxification of lead ions in legumes. *Phytochemistry*, 60(2): 153-162.
- Pignocchi C., Foyer C.H., 2003-** Apoplasmic ascorbate metabolism and its role in the regulation of cell signaling. *Current Opinion in Plant Biology*, 6(4): 379-389.
- Pitzschke A., Forzani C., Hirt H., 2006-** Reactive oxygen species signaling in plants. *Antioxidant.Redox Signal*, 8(9-10): 1757-64.
- Poskuta J.W., Parys E., Romanowska F., 1987-** The effects of lead on the gaseous exchange and photosynthetic carbon metabolism of pea seedling. *Acta societatis botanicorum Poloniae*, 56: 127-137.
- Poskuta J.W., Parys E., Romanowska F., 1988-** The effects of lead on photosynthesis <sup>14</sup>C distribution among photoassimilates and transpiration of maize seedlings. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 57: 149-155.

**Potters G., De Gar L., Asard H., Horemans N., 2002** - Ascorbate and glutathione: guardians of the cell cycle, partners in crime?" *Plant Physiology and Biochemistry*, 40(6-8): 537-548.

**Pourrut B., 2008**- Implication du stress oxydatif dans la toxicité du plomb sur *Vicia faba*. Thèse de Doctorat. Option Eco toxicologie. Institut national de Toulouse, 281p.

**Prasad M.N.V., Hagemeyer F., 1999**- Heavy Metal Stress in Plants: From Molecules to Ecosystems. Berlin, Springer-Verlag.

**Prasad M., Mulee P., Waloszek A., Bojko M., Strzatka K., 2001**-Physiological Responses of *Lemna trisulca* L.to Cadmium and Copper Bioaccumulation, *Plant Science*, vol,161: 881-889.

**Prud'homme R., 1980**- Le ménagement de la nature, des politiques contre la pollution. Ed. Dunod. 212p.

## Q

---

**Qureschi M.I., Israr M., Abdin M.Z., Iqbal M., 2005**- Responses of *Artemisia annua* L.to lead and salt induced oxidative stress. *Environ. Exp. Bot.*, 53(2), 185-193.

**Qureshi M.I., Abdin M.Z., Qadir S., Iqbal M., 2007**.-Lead induced oxidative stress and metabolic alterations in *Cassia angustifolia* Vahl. *Biologia Plantarum*, 51(1), 121-128.

## R

---

**Raskin I., Ban P., Kumar S., Dushenkov S., Salt D.E., 1994**- Bioconcentration of heavy metals by plants. *Curr. Opin. Biotechnol.*, 5: 285-90. Reese R.N. and Roberts L.W., 1985.

**Raskin I., Ensley B.D., 2000**-Phytoremediation of metals: using plants to clean up the environment. John Wiley and Son, New York.

**Rauser W.E., 1995**- Phytochelatins and related peptides: structure, biosynthesis and function. *Plant. Physiol.*, 109, 1141-1149.

**Reddy A.M., Kumar S.G., Jyonthsnakumari G., Thimmanaik S., Sudhakar C., 2005**- Lead induced changes in antioxidant metabolism of horsegram (*Macrotyloma uniflorum* [Lam.] Verdc.) and bengalgram (*Cicer arietinum* L.). *Chemosphere*, 60, 97-104

**Reid K., 2003**-Fertilité des fourrages. Publication du MAAO. Ontario. Canada.

Site Web: [ag.info.comaf.gov.on.ca.Canada](http://ag.info.comaf.gov.on.ca.Canada).

**Rengel Z., 1999**-Heavy Metals as Essential Nutrients. *In*: Prasad, M.N.V.and Hagemayer,J.(Eds.). *Heavy metal stress in plants: From molecules to ecosystems*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 231-251.

**Rolfe G.L., 1973** - Lead uptake by selected tree seedlings. *J. Environ. Quality*, Vol 2 (1): 153-157.

**Rooney CP., Mc Laren R.G., Cresswell R.J., 1999**- Distribution and phytoavailability of lead in a soil contaminated with lead shoot. *Water, Air and Soil Pollution*, 116: 535-548.

**Ruley A., Sharma N.C., Sahi S.V., 2004**- Antioxidant defense in a lead accumulating plant, *Sesbania drummondii*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 42(11): 899-906.

## S

---

**Samson d., Morel S., 1995**- Heat denaturation of durum wheat semolina B-Analyzed: effects of chemical factors and Pasta processing conditions. *Journal of Food Science*,

**Santa Di Toppi L., Gabrielli R., 1999**- Responses to cadmium in higher plants. *Environ.Exp.Bot*, 41: 105-130.

**Saradhi A.P., Saradhi P.P., 1991**- Proline accumulation under heavy metal stress. *Journal of Plant physiology*, 138(5): 554-558.

**Saxena A., Saxena D.K., Srivastava H.S., 2003**-The Influence of Glutathione on Physiological Effects of Lead and its Accumulation in Moss *Sphagnum Squarrosom*. *Water, Air, & Soil Pollution*, 143(1): 351-361.

**Sayed S.A., 1999**- Effects of lead and kinetin on the growth, and some physiological components of sunflower. *Plant Growth Regulation*, 29 (3): 167-174.

**Scheifer R., Schawartz C., Echevarria G., de Vaufleury A., Badot P.M., Morel J.L., 2003**-“Nonavailable” soil cadmium is bioavailable to snails .Evidence from isotopic dilution experiments. *Environ.Sci.Technol*, 37, 8-86.

**Selim., 2000**-Fin du mythe de l'autosuffisance alimentaire et place aux avantages comparatifs. *Revue Afrique Agriculture*.N<sup>o</sup>280.pp 30-32.

**Semadi A., 1989**- Effets de la pollution, atmosphérique (fluorée et plombique) sur la végétation dans la zone d'Annaba. Thèse Doctorat, Université, Pierre et Marie Curie. Paris.340p.

**Serdouh M.**,1999- Caractérisation biochimique et génétique des protéines de réserve des blés durs algériens (*Triticum durum* Desf.) en relation avec la qualité. Thèse d'Ingénieur en agronomie. ENSA. EL Harrach, 83p.

**Seregin I.V., Ivanov V.B., 1998-** The transport of cadmium and lead ions through root tissues. *Russian Journal of Plant Physiology*, 45: 899-905.

**Seregin I.V., Ivanov V.B., 2001-**Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 48 (4): 523-544.

**Seregin I.V., Pekhov V.M., Ivanov V.B., 2002-**Plasmolysis as a Tool to Reveal Lead Localization in the Apoplast of Root Cells. *Russian Journal of Plant Physiology*, 49(2): 283-285.

**Seregin I.V., Shpigun L.K., Ivanov V.B., 2004-** Distribution and toxic effects of Cadmium and Lead on maize roots. *Russian Journal of Plant Physiology*, 51 (4): 525-533.

**Servais S., 2004-**Altérations mitochondriales et stress oxydant pulmonaire en réponse à l'ozone : effet de l'âge et d'une supplémentation en oméga -3.Thèse de Doctorat. Université Claude Bernard, Lyon1, 163p.

**Sharma P., Dubey R.S., 2005-** Lead toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(1): 35-52.

**Shields M., Burnett W., 1960-**Determination of protein-bound carbohydrates in serum by modified anthrone method. *Anal. Chem.*, 32, 885-886.

**Shirefaw B., Baker, D.A., 1996-** An evaluation of drought screening technics for *Eragotis tef*. *Crop. Sci.*, 36: 74-85.

**Sies H.**, 1991-Oxidative stress: introduction. *In: Sies H.(ed), oxidative stress, oxidants and antioxidants.* Academic Press, San Diego, I-XV, 650p.

**Sies H., 1997-**Oxidative stress: oxidants and antioxidants. *Experimental Physiology*, 82(2): 291-295

**Sies Y.F., Wike B.M., Song X.Y., Gong P., Zhou Q.X., Yang G.F., 2006-** Polycyclic aromatic hydrocarbons (PCBs) and heavy metals (HM) as well as their genotoxicity in soils after long term wastewater irrigation Ares and bioremediation site using the *Vicia faba* root tip micronucleus assay. *Journal of Environmental Monitoring*, 9: 182-186.

**Singh R.P., Tripathi R.D., Sinka S.K., Maheshwari R., Srivastava H.S., 1997-** Responses of higher plants to lead contaminated environment. *Chemosphere*, 34(11): 2464-2493.

- Smirnoff N., 1998-** Plant resistance to environmental stress. *Current Opinion in Biotechnology*, 9(2): 214-219.
- Soltner D., 1982-** Les grandes productions végétales. Céréales -Plantes sarclées-Prairies. Ed. Sci. et Tech. Agri. 460p.
- Soltner D., 2005 -** Les bases de la production végétale: le climat, le sol, plante 20<sup>ème</sup> Ed. Ed. Sci. et Tech. Agri. 312p.
- Spagnoletti-Zeuli P.L., Quallsat C.O., 1990-** Flag leaf variation and analysis of diversity in durum wheat. *Plant Breed*, 105: 189-202.
- Sposito G., Lund. L.J., Chang A.C., 1982-** Trace Metal Chemistry in Arid-zone Field Soils Amended with Sewage Sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in Solid Phases. *Soil Science Society American Journal*, 46(2): 260-264.
- Srivastava J.P., 1984-** Durum wheat: its world status and potential and the Middle East and North Africa. *Rachis*, 3(1): 1-9.
- Srivastava S., Tripathi R.D., Dwevidi U.N., 2004-** Synthesis of phytochelatin and modulation of antioxidants in response to cadmium stress in *Cuscuta reflexa* - an angiospermic parasite. *J. Plant. Physiol*, 161, 665-674.
- Stefanov K., Popov I., 1993-** Lipid and sterol changes in *Zea mays* caused by lead ions. *Phytochemistry*, 33(1): 47-51.
- Stefanov K., Seizova K., Pandev M., Yanishlieva N., Marinova E., Tyankova L.T., Kulova. L Popo v S., 1995-** Effect of lead ions on lipids and antioxidant complex activity of *Capsicum annum* L. leaves, pericarp and seeds. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 67(2): 259-266.
- Stiborova M., Doubravova M., Brezinova A., 1986-** Effect of heavy metal ions on growth and biochemical characteristics of photosynthesis of barley (*Hordeum vulgare* L). *Photosynthetica*, 20(4): 418-425.
- Sterckeman T., Douay F., Proix N., Fourrier H., 2000-** Vertical distribution of Cd, Pb, and Zn in soils near smelters in the north of France. *Environmental Pollution*, 107: 77-389.
- Sundquist E.A., Briviba K., Sies H., 1994-** Singlet oxygen quenching by carotenoids. *Methods Enzymol*, 234, 354-366.

## T

---

**Tanton T.W., Crowdy S.H., 1971-** The distribution of lead chelate in the transpiration stream of higher plants. *Pesticide Science*, 2(5): 211-213.

**Telfer A., Dhami S., Bishop S., Phillips D., Barber J., 1994-** Beta-Carotene quenches singlet oxygen formed by isolated photosystem II reaction centers. *Biochemistry*, 33(48): 14469-74.

**Tomulescu I.E., Radoviciu V., Merca N.A., Tuduce A., 2004-** Effects of copper, zinc and lead and their combinations on the germination capacity of two cereals. *J. Agric. Sci.*, 15, 39-42.

**Tukendor A., Baszynski T., 1991-** The in vivo Effect of Cadmium on Photochemical Activities in Chloroplasts of Runner Bean Plants. *Acta.Physiol.Plant*, 13: 81-87

**Tung G. Temple P.J., 1996b-** Uptake and localization of lead in corn (*Zea mays* L.) Seedlings, a study by histochemical and electron microscopy. *Science of the Total Environment*, 188(2-3): 71-85.

**Turcsanyi E., Lyons T., Plöchl M., Barnes J., 2000-** Does ascorbate in the mesophyll cell walls form the first line of defence against ozone? Testing the concept using broad bean *Vicia faba* L. *Journal of Experimental Botany*, 51: 901-910.

## V

---

**Van Assche F., Clijsters H., 1990-** Effects of Metals on Enzymes Activity in Plants. *Plant Cell Environ*, 13: 195-206

**Vasile G.C., Cojocaru D.C., Misaila C., Ciornea E., 2005-** L'étude de l'activité des quelques enzymes du stress oxydatif dans le tissu musculaire à des différents cyprinidés de culture. *Analele stiintifice ale Universitatii, Alexandru Ioan Cuza", Genetica si Biologie Moleculara*, 5, 7-10.

**Vassil AD., Kapulnik Y., Raskin I., Salt D.E., 1998-** The Role of EDTA in Lead Transport and Accumulation by Indian Mustard." *Plant Physiology* 117(2): 447-453.

**Verma S., Dubey R.S., 2003-** Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants. *Plant Science*, 164(4): 645-655.

**Viala., 1998-** Eléments de toxicologie. Ed. Tech et Doc Lavoisier, Paris, pp: 288-303.

**Vodnik D., Jentschke G., Fritz E., Gogala N., Godbold D.L., 1999-** Root applied cytokinin reduces lead uptake and effects its distribution in Norway spruce seedlings. *Physiol. Plant.*, 106(1), 75-81.

W

---

**Weckecker G., Cory J.G., 1998-** Ribonucleotide reductase activity and growth and growth of glutathione-depleted mouse Leukemia L 1210 cells in vitro. *Cancer letters*, 40,257-264.

**Wieryszko-Chlwielska E.,Chwil M., 2005-**Lead induced Histological and Ultrastructural Changes in the Leaves of Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). *Soil and Plant Nutrition*, 51(2): 203-212.

**Wierzbicka M., 1987-** Lead translocation and localization in *Allium cepa* roots. *Canadian Journal of Botany*, 65(9): 1851-1860

**Wierzbicka M., Obidzinska J., 1998-** The effects of lead on seed imbibition and germination in different plant species. *Plant Sci.*, 137(2), 155-171

**Wierzbicka M., 1999 b-** The effect of lead on the cell cycle in the root meristem of *Allium cepa* L. *Protoplasm*, 207(3), 186-194.

**Willekens H., Chamnongpol S., Davey M., Schraudner M., Langebartels C., Montagu M.V., Inzé D., Camp W.V., 1997-** Catalase is a sink for H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and is indispensable for stress defence in C3 plants. *The EMBO Journal*, 16: 4806-4816.

**Wingate V.P.M., Lawton. M.A., Lamb C.J., 1988-** Glutathione Causes a Massive and Selective Induction of Plant Defense Genes. *Plant Physiology*, 87(1): 206-210.

**Wozny A.J., Schneider J., Gwozdz E.A., 1995-** The effect of lead and kinetin on greening burley leaves. *Biol. Plant.*, 37(4), 541-552.

X

---

**Xiong, Z.T., 1997-** Bioaccumulation and physiological effect of excess lead in a read side pioneers species. *Sonchus oleraceus* L. *Environmental pollution*, 97: 275-279.

**Xiong Z.T., Zhao F., Li M., 2006-**Lead toxicity in Brassica perkinensis. Rupr: Effect on nitrate assimilation and growth. *Environmental Toxicology*, 21(2): 147-153.

**Z**

---

**Zadoks, J.C., Chang T.T., Konzac C.F., 1974-** A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.* 14, 415-421.

**Zembala M., Filek M., Kornas A., Miszalski Z., Walas S., Mrowiec H., Hartikainen H., 2009-** Effect of selenium on macro and microelement distribution and physiological parameters of rape and wheat seedlings exposed to cadmium stress. *Plant Soil*, 329, 457-468.

**Zheljaskov V.D., Cracker L.E., Xing B ., 2006-** Effect of Cd, Pb and Cu on growth an essential oil content in dill peppermint and basil. *Environmental and Experimental Botany*, 58(1-3): 9-16.

## Résumé

Ce présent travail consiste à connaître l'impact du plomb sur les paramètres physiologiques, biochimiques et enzymatiques deux variétés de blé dur *Triticum durum* Desf. cv Vitron et Gta. Sur la germination l'effet du plomb  $Pb(NO_3)_2$  a été analysé aux concentrations: 0, 0.32, 0.43 et 0.64g.l<sup>-1</sup> de nitrate de plomb  $Pb(NO_3)_2$  équivalentes à (0M, 1mM, 1.3mM et 2 mM), et sur la croissance aux concentrations suivantes : D<sub>0</sub> (témoin) D<sub>1</sub> (150mg de Pb.Kg<sup>-1</sup> de sol), D<sub>2</sub> (300mg de Pb.Kg<sup>-1</sup> de sol et D<sub>3</sub> (500mg de Pb.Kg<sup>-1</sup> de sol).

Les résultats obtenus montrent qu'une absence totale de la germination a été constatée chez les deux variétés dans les graines traitées avec la concentration la plus forte (2mM). Le traitement des graines par la concentration 1mM a réduit la germination des 2 variétés. L'application de doses croissantes en plomb diminue considérablement les paramètres germinatifs, la teneur en pigments et perturbe le métabolisme cellulaire des sucres solubles, des protéines et de l'acide aminé proline. Au-delà de la concentration 0.64g.l<sup>-1</sup> de solution de  $Pb(NO_3)_2$ , (2mM) l'inhibition du processus de germination est totale chez les deux variétés.

En revanche, sur la croissance, l'étude sur des paramètres tels que la surface foliaire le poids spécifique des feuilles, la teneur relative en eau des tissus et aussi la réponse antioxydante des plantes soumises à ce stress métallique, les résultats obtenus montrent un effet dépressif du Pb sur tous les paramètres physiologiques étudiés et une perturbation de l'activité de toute la machinerie enzymatique notamment, la peroxydase (POD), la catalase (CAT), la gaïacol peroxydase (GPX) l'ascorbate peroxydase (APX) et enfin le glutathion sulfotransférase (GST),

D'une manière générale, la teneur élevée en plomb a induit des changements sur le plan moléculaire qui affectent le fonctionnement cellulaire soit par le blocage et l'inhibition de l'activité enzymatique régissant les réactions de synthèse et de détoxification, soit par une légère stimulation causée par les faibles teneurs et due à une activation du métabolisme cellulaire par exemple, une absorption de O<sub>2</sub> dans les feuilles où une augmentation de l'activité du PSII (activité photosynthétique) dans les chloroplastes.

Mots-Clés: Plomb -germination- croissance - stress oxydant- activité - enzyme

**Abstract**

The aim of this present work is to know the lead effects of on two varieties of durum wheat *Triticum durum* Desf. cv. Vitron and Gta. In the germination process, the lead effect was analyzed at the concentrations: 0, 0.32, 0.43 et 0.64g.l<sup>-1</sup> of lead nitrate Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> equivalents to (0M, 1mM, 1.3mM et 2 mM). On growth process, the following concentrations are: D<sub>0</sub> (control) D<sub>1</sub> (150 mg of Pb.Kg<sup>-1</sup> soil), D<sub>2</sub> (300 mg of Pb. Kg<sup>-1</sup> soil and D<sub>3</sub> (500 mg of Pb . Kg<sup>-1</sup> soil) on parameters such as leaf area, specific leaf weight, the relative water content of tissues and also the antioxidant response of plants subjected to metal stress.

The gotten results show a real sensitivity of germination to this kind of pollutant pollution. Indeed, we note a total absence of germination at the two varieties in all seeds dealt with the strongest concentrations, (2mM). The treatment of the seeds by the 1mM level reduced the germination of the two varieties. In a general manner the application of increasing doses of lead decreases the faculty and the germinative parameters considerably, the content in pigments and disrupt the cellular metabolism, the soluble sugars, the proteins and proline. Beyond the concentration (2mM) of solution, the inhibition of the germination process is total at the two varieties.

On the other hand, the study on parameters such as leaf area, specific leaf weight, relative water content of tissues and also the antioxidant response of plants subjected to metal stress, the results show a depressive effect of (Pb) on the physiological parameters studied and impaired activity of the entire enzymatic machinery including, peroxidase (POD), catalase (CAT), guaiacol peroxidase (GPX), ascorbate peroxidase (APX) and finally glutathione sulfotransferase (GST).

In general manner, the high levels of lead induced changes at the molecular level that affect cell function either by blocking and inhibiting the enzymatic activity governing the synthesis reactions and detoxification, either by a slight stimulation caused by low levels and due to activation of cell metabolism, for example, an O<sub>2</sub> uptake in the leaves where an increased activity of PSII (photosynthetic activity) in chloroplasts.

Key-words: Lead - Germination - Growth - Oxidative stress - Activity – Enzyme.

الملخص:

إشتمل هذا العمل على تأثير الرصاص على عدة جوانب فيزيولوجية، بيوكيميائية و أنزيمية على صنفين من القمح الصلب *Triticum durum* (GTA)، *Triticum durum* (Vitron) و قد تم تحديد تأثير الرصاص Pb<sub>2</sub>(NO<sub>3</sub>) على الإنتاش من خلال إختبار التراكيز: 0,43، 0,032 و 0,64 غ/الترلنترات الرصاص Pb<sub>2</sub>(NO<sub>3</sub>) المعادلة ل (0 مول، 1 ملي مول و 2 ميلي مول)، و على النمو بالتراكيز التالية : ت<sub>0</sub> الشاهد ، ت<sub>1</sub> (150 ملغ من Pb<sup>2+</sup> . كلغ<sup>-1</sup> من التربة)، ت<sub>2</sub> (300 ملغ من Pb<sup>2+</sup> . كلغ<sup>-1</sup> من التربة) و ت<sub>3</sub> (500 ملغ من Pb<sup>2+</sup> . كلغ<sup>-1</sup> من التربة).

أظهرت النتائج المتحصل عليها غياب كلي للإنتاش تم ملاحظته عند صنفى البذور المعاملة بأعلى تركيز (2 ميلي مول). في حين معاملة البذور بتركيز 1 ميلي مول خفض من انبات الصنفين. فان تطبيق زيادة جرعات الرصاص يخفض بشكل معتبر ظواهر الإنبات، محتويات التصبغ و يحدث إضطراب أيضا خلوي للسكريات المذابة، للبروتينات و الحمض الأميني برولين. و ما فوق تركيز 0,64 غال<sup>-1</sup> من محلول Pb<sub>2</sub>(NO<sub>3</sub>)، 2 ميلي مول تحدث تثبيط ظاهرة الإنتاش كليا عند الصنفين.

من ناحية النمو، فإن الدراسة على عوامل مثل مساحة سطح الورقة، الوزن النوعي للأوراق، المحتوى النسبي لماء الأنسجة و أيضا الإستجابة لمضاد الأكسدة للنباتات المعرضة للإجهاد المعدني، فان النتائج المتوصل اليها تبين تأثير الرصاص على كل الظواهر الفيزيولوجية المدروسة و إضطراب في نشاط كل الألية الأنزيمية خاصة: CAT، POD، (GPx) (APx) و اخيرا (GST).

بصفة عامة، شدة الرصاص المرتفعة أحدثت تغيرات على المستوى الجزيئي الذي يؤثر على الخلوي الإنزيمي بردود فعل التي تتحكم في تركيب و إزاتة السمية، أو بتحفيز ضعيف تسببت فيه المستويات الضعيفة و النلجمة عن تنشيط الأيض الخلوي عل سبيل المثال : إمتصاص O<sub>2</sub> من طرف الأوراق، أو زيادة نشاط PSH (نشاط التركيب الضوئي) داخل الصانعات الخضراء.

الكلمات المفتاحية:

الرصاص، إنتاش، نمو، إجهاد الأكسدة، نشاط، أنزيم.