

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



جامعة الإخوة منتوري قسنطينة I

Frères Mentouri Constantine I University

Université Frères Mentouri Constantine I

Université Frères Mentouri Constantine
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Biologie et Ecologie

جامعة الاخوة منتوري قسنطينة
كلية علوم الطبيعة والحياة

قسم بيولوجيا وايكولوجيا النبات

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : biodiversité et physiologie végétale

N° d'ordre :

N° de série :

Intitulé :

**Evaluation du comportement biochimique et antioxydant des deux espèces
Quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) et Maïs (*Zea mays L*) sur l'effet du stress
oxydatif provoqué par un stress hydrique**

Présenté par : Meziane Bouchra

Boussouf Narjes Chiraz

Le 20/06/2022

Jury d'évaluation :

Encadreur : BOUCHAREB RADIA (MCA- Université Frères Mentouri, Constantine 1).

Examineur 1 : BAZRI KAMEL EDDINE (MCA - Université Frères Mentouri, Constantine 1).

Examineur 2 : ZAGHED NADIA (MCA - Université Frères Mentouri, Constantine 1).

**Année universitaire
2021 - 2022**



REMERCIEMENT

Avant tout, je remercie **Dieu le tout puissant et miséricordieux** de m'avoir donné la chance d'étudier et de m'avoir procuré force, courage, et patience pour compléter ce travail.

Un grand merci pour **nos parents** qui ont veillé sur nous, et qui ont tout sacrifié pour notre bien-être.

A notre encadreur madame BOUHAREB RADIA

Nous vous remercier pour votre aide, orientation et tolérance qui nous ont encouragés durant ce labeur, et surtout pour votre disponibilité malgré vos obligations professionnelles.

Veillez croire à l'expression de notre profonde reconnaissance et notre grand respect.

Nous tenons à remercier aussi les membres du jury monsieur **Bazri Kamel Eddine** et madame **Zaghed Nadia**.

Bouchra & Chiraz



DÉDICACE

En signe de respect et d'appréciation, je tiens à dédier ce modeste travail :

À Maman, pour tout l'amour et le soutien inconditionnel que tu m'as apportée tout au long des étapes de ma vie. Je ne sais comment te remercier pour tout ce que tu as fait pour moi, c'est grâce à toi si j'en suis arrivée là. Cette journée marque l'aboutissement de ces années de travail j'espère te rendre fière. Que Dieu te garde pour moi.

À Papa, parce que tu m'as transmis les valeurs du travail, de la rigueur et de l'ambition. Tu m'as toujours soutenue et aidée à avoir confiance en moi lorsque j'en avais besoin.

À Mes frères Didou, Oussama et Badis

A mes amies et surtout à mes partenaires Adel, Imene qui m'ont beaucoup aidé.

Je dédie également ce travail à tous ceux qui m'ont encouragée et aidée à réaliser ce travail de près ou de loin et qui ont participé à ma réussite.

Bouchra

DÉDICACE

À MES PARENTS et GRANDS-PARENTS pour tous leurs sacrifices

À MON CHER MARI IMED qui m'a beaucoup aidé durant toutes ces années

A MES CHERS FRÈRES ROSTOM RAOUF pour leurs appuis et leurs encouragements

A MA SEULE ET UNIQUE SŒUR MARWA pour son soutien moral

A MA NIÈCE GISÈLE qui m'a donnée beaucoup espoir à la vie

A MA BELLE-FAMILLE qui m'a toujours soutenu et était toujours là pour moi

A MES PETITS COUSINS ADORÉ RACIM ET SKANDER qui me redonne la joie

A MON BINÔME CHER AMI BOUCHRA pour son aide et sa présence

A TOUTES MA FAMILLE d'être à mes côtés tous le long de ce parcours.

Chiraz

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement biochimique et antioxydant des deux espèces Quinoa et Maïs. Les paramètres mesurés ont été réalisés au sein de la faculté des sciences et la nature Université Mentouri Constantine 1.

Les dosages sont : La glycine bétaine, le malonedialdéhyde (MDA), le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), les protéines, les polyphénols et les flavonoïdes.

Les résultats de cette étude indiquent qu'il y a une variabilité entre les deux espèces stressées et non stressées. La variabilité a été évaluée grâce à des analyses statistiques. Les résultats obtenus montrent que le stress hydrique a entraîné une production des espèces réactives de l'oxygène (ERO) ainsi que le rôle important des métabolites secondaires dans la défense contre le stress oxydatif causé par le stress hydrique. La concentration de la glycine bétaine, MDA, et le H_2O_2 a été plus élevée l'espèce Quinoa par les valeurs suivantes (0.01 mg/ml, 0,38 nmol/ml et 8,09mg/ml, respectivement), par contre les protéines totales la valeur maximale a été notée chez le Maïs (0.09 mg/ml). Concernant les antioxydants les polyphénols et les flavonoïdes, on a enregistré des concentrations basses chez le Quinoa stressé (1.22mgEAG/g, 0.13mgEQ/g, respectivement) contrairement chez le Maïs (2.88mgEAG/g, 2.02mgEQ/g).

En conclusion, l'étude a montré que le Quinoa est plus tolérant et efficace que le Maïs contre les contraintes hydriques.

Mots-clefs : stress hydrique, stress oxydatif, antioxydants, Quinoa, Maïs.

Abstract

The objective of this work is to study the biochemical and antioxidant behaviour of the two species Quinoa and Maize. The measured parameters were performed within the Faculty of Science and Nature University Mentouri Constantine 1.

The assays are: Betaine glycine, malonedialdéhyde (MDA), hydrogen peroxide (H_2O_2), proteins, polyphenols and flavonoids.

The results of this study indicate that there is variability between the two stressed and non-stressed species. Variability was assessed through statistical analysis. The results obtained show that water stress has led to the production of reactive oxygen species (ERO) as well as the important role of secondary metabolites in defense against oxidative stress caused by water stress. The concentration of beta glycine, MDA, and H_2O_2 was higher in the Quinoa species by the following values (0.01 mg/ml, 0.38 nmol/ml and 8.09 mg/ml, respectively), whereas total proteins the maximum value was noted in Maize (0.09 mg/ml). For antioxidants polyphenols and flavonoids, low concentrations were observed in stressed quinoa (1.22mgEAG/g, 0.13mgEQ/g respectively) compared to controls in corn (2.88mgEAG/g, 2.02mgEQ/g)

Keywords: water stress, oxidative stress, antioxidants, quinoa, corn.

الملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة السلوك البيوكيميائي والسلوك المضاد للأكسدة لنوعي الكينوا والذرة. تم تنفيذ المعايير التي تم قياسها داخل كلية العلوم وجامعة الطبيعة منتوري قسنطينة 1.

العناصر التي تم قياسها هي: جلايسين بيتين (GB)، مالونيدىالديهيد (MDA)، بيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2)، بروتينات، بوليفينول وفلافونيدات.

تشير نتائج هذه الدراسة إلى وجود تباين بين الأنواع المجهدة وغير المجهدة. تم تقييم التباين باستخدام التحليلات الإحصائية. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن الإجهاد المائي أدى إلى إنتاج أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS) بالإضافة إلى الدور المهم للمستقبلات الثانوية في الدفاع ضد الإجهاد التأكسدي الناجم عن الإجهاد المائي. كان تركيز جلايسين بيتين أعلى عند الكينوا بالقيم التالية (0.01 مجم / مل، 0.38 نانومول / مل و 8.09 مجم / مل، على التوالي)، بينما لوحظت القيمة القصوى في الذرة (0.09 مجم / مل). فيما يتعلق بمضادات الأكسدة، البوليفينول والفلافونويد، تم تسجيل تركيزات منخفضة في الكينوا المجهدة (1.22 مجم / مل). حمض الغاليك/غ، 0.13 مجم مكافئ حمض الغاليك/غ على التوالي) على عكس الذرة (2.88، ملغ مكافئ كاتسين/غ 2.02 ملغ مكافئ كاتسين/غ) مقارنة بالشواهد.

في الختام، أظهرت الدراسة أن الكينوا أكثر قدرة على التحمل وفعالية من الذرة ضد الإجهاد المائي.

الكلمات المفتاحية: الإجهاد المائي، الإجهاد التأكسدي، مضادات الأكسدة، الكينوا، الذرة.

Sommaire

Introduction	2
CHAPITRE I : Revue bibliographique	
I. Présentation des espèces	5
1. Le quinoa	5
1.1. Description	5
1.2. Classification scientifique	5
1.3. Origine et histoire	6
2. Le maïs	6
2.1. Description	6
2.2. Classification scientifique	7
2.3. Origine et historique	7
2.4. le stress	7
II. Le stress hydrique	8
1. définition	8
2. Les conséquences de stress hydrique	9
3. les mécanismes de résistance contre le stress hydrique	9
4. La relation entre stress hydrique et stress oxydatif	10
III. Le stress osmotique	11
1. Définition	11
2. Les effets du stress osmotique	11
2.1. Effet du stress osmotique sur le changement de conductivité hydraulique des tissus	11
3. L'ajustement osmotique	12
3.1. La glycine bêtaïne	12
IV. Le stress oxydatif	13
1. Définition	13
2. Les conséquences du stress oxydatif sur la plante	13
2.1. Les conséquences du stress oxydatif aux lipides	13
2.2. Les conséquences du stress oxydatif aux protéines	13
V. les espèces réactives de l'oxygène	14
1. Définition	14
2. Les radicaux libres	14

2.1. Sources	15
2.1.1. Sources endogènes	15
2.1.2 Sources exogènes	15
3. Les mécanismes de résistance contre les espèces réactives de l'oxygène	16
VI. les antioxydants	17
1. Les antioxydants enzymatiques et leurs systèmes	17
1.1. Le Superoxyde dismutase (SOD)	17
1.2. Les Catalases (CAT)	17
1.3. La Glutathion peroxydase (GPx)	17
1.4. La thiorédoxine (TRX)	18
1.5 Le malondialdéhyde (MDA)	18
1.5.1. Intérêt du dosage du malonedialdéhyde (MDA)	18
2. Les antioxydants non enzymatiques	18
2.1. Les polyphénols	19
2.1.1. Les flavonoïdes	19
2.1.1.1. Structure chimiques des flavonoïdes	19
2.1.1.2. Classification	20
2.1.1.3. Activités biologiques des flavonoïdes	21
2.1.2. Les tanins	22
2.1.3. Les anthocyanes	21
3. Mécanisme d'action des antioxydants	21
CHAPITRE II : Matériel et méthodes	
1. Matériel végétale	25
2. Mise en Expérimentations	26
2.1. Dosage de peroxyde d'hydrogène H ₂ O ₂	26
2.2. Dosage de malonedialdéhyde MDA	26
2.3. Dosage des protéines totales	27
2.4. Dosage des polyphénols totaux	28
2.5. Dosage des flavonoïdes	29
2.6. Dosage de glycine betaine	30
3. L'analyse statistique.....	30
CHAPITRE III : Résultats et discussion	
1. Le peroxyde d'hydrogène (H ₂ O ₂)	32

2. Le malonedialdéhyde (MDA)	33
3. Les protéines totales	34
4. Les polyphénols totaux	35
5. Les flavonoïdes	36
6. La glycine betaine	37
Discussions générales	38
Conclusion générale	41
Références bibliographiques	43
Annexes	

LISTE DES ABRÉVIATIONS

- ADN :** Acide Désoxyribonucléique
- ANOVA :** Analyse de variance
- ARNm :** Acide désoxyribonucléique messenger
- CAT :** Catalase
- Fao:** Food and agriculture organisation
- GPx:** Glutathion peroxydase.
- GSH :** Glutathion réduit
- H₂O₂ :** Peroxyde d'hydrogène
- MDA :** Malonedialdéhyde
- NADPH :** Nicotinamide adénine dinucléotide phosphate réduit
- Pox :** Peroxydase
- ROS :** Reactive Oxygen Space (espèces réactives de l'oxygène)
- S :** Stressé
- SOD :** Super Oxydes Dismutases
- T :** Témoin
- TRX:** Thiorédoxine

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux	Pages
Tableau 1 : classification de <i>Chenopodium quinoa</i> Willd.	5
Tableau 2 : classification de <i>Zea Mays</i> .	7
Tableau 3 : Espèces réactives d'oxygène d'intérêt biologique.	15
Tableau 4 : Espèces réactives d'azote d'intérêt biologique.	16
Tableau 5 : Les principales classes des flavonoïdes.	21
Tableau 6 : variétés et origines des deux espèces.	25

LISTE DES FIGURES

Figures	Pages
Figure 1 : Stratégie d'évitement. Maintien de l'état hydrique foliaire du maïs (<i>Zea mays</i>)	10
Figure 2 : Aperçu des différentes espèces réactives de l'oxygène (ERO) et des antioxydants régulateurs de leur production	14
Figure 3 : Structure générale des flavonoïdes	20
Figure 4 : germination des grains	25
Figure 5 : le quinoa témoin et stressé	25
Figure 6 : le maïs témoin	25
Figure 7 : le maïs stressé	25
Figure 8 : dosage de peroxyde d'hydrogène H ₂ O ₂	26
Figure 9 : dosage de malonaldehyde MDA	27
Figure 10 : dosage des protéines	27
Figure 11 : dosage des polyphénols	28
Figure 12 : dosage des flavonoïdes	29
Figure 13 : dosage de la glycine betaine	30
Figure 14 : La concentration de peroxyde d'hydrogène (H ₂ O ₂) chez les deux espèces sous stress hydrique.	32
Figure 15 : La concentration de malonaldehyde MDA chez les deux espèces sous stress hydrique.	33
Figure 16 : La concentration des protéines chez les deux espèces sous stress hydrique.	34
Figure 17 : La concentration de la glycine bétaine chez les deux espèces sous stress hydrique.	35
Figure 18 : La concentration des polyphénols chez les deux espèces sous stress hydrique	36
Figure 19 : La concentration des flavonoïdes chez les deux espèces sous stress hydrique.	37



INTRODUCTION



Dans le monde, la productivité et le développement agricole sont confrontés à plusieurs contraintes biotiques (les champignons, les bactéries et les insectes) et abiotiques (sécheresse, froid, gel et salinité). Parmi ces contraintes, celle hydrique et saline sont considérées comme les facteurs les plus importants limitant la production notamment au niveau des régions arides et semi arides (Rjeibi et *al.*, 2015).

Le déficit en eau est l'une des contraintes les plus courantes de l'environnement qui influe sur la croissance et le développement des plantes (Aslam et *al.*, 2006). Cette sécheresse qui peut intervenir à différentes périodes du cycle de la vie de la plante est étroitement liée au stade de développement de la plante (Chaves et *al.*, 2002; Jaleel et *al.*, 2008).

Le stress hydrique provoque une altération de la mitose, et déséquilibre nutritionnel, les échanges gazeux, les métabolismes de croissance primaire et secondaire, ainsi provoquant une réduction dans la productivité des cultures. Les membranes cellulaires sont très sensibles à la sécheresse car elles provoquent un stress oxydatif.

Et son effet sur la plante dépend d'une série de facteurs tels que principalement l'intensité de l'épisode sec, sa durée et le climat pendant cette sécheresse (température, humidité relative et rayonnement), mais aussi la phase phénologique durant laquelle elle se produit, le génotype de la plante ou le fait qu'elle ait déjà souffert de sécheresse à un stade précédent, ou enfin les caractéristiques du sol et la tolérance de la plante au déficit hydrique (Mujica et *al.*, 2001).

L'ajustement osmotique par accumulation d'osmolytes, l'autodéfense végétale par accumulation d'antioxydants, les régulateurs de croissance des plantes, les protéines des stress et les protéines des canaux d'eau, la transcription des facteurs et les voies de transduction du signal sont impliqués dans l'attribution de la tolérance à la sécheresse.

Le quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) retenu par la FAO comme la plante de l'année 2013, est une plante originaire d'Amérique du sud (Benes et *al.*, 2001) très adaptée aux différents stress abiotiques comme la sécheresse (stress hydrique), le gel (Jacobsen et *al.*, 2003 ; Mujica et *al.*, 2001). Cette plante halophytique a une capacité potentielle importante de croître sous différentes conditions agro-climatiques dans plusieurs pays du monde (Adolf et *al.*, 2013 ; Shabala et *al.*, 2013). Et le quinoa a le potentiel de croître en tant que culture alternative dans les zones soumises à des contraintes abiotique (stress hydrique), y compris la sécheresse pour l'agriculture (Aziz et *al.*, 2017)

Le maïs (*Zea mays* L) est parmi les cultures céréalières de premier plan dans le monde, mais il est sensible à la sécheresse. Il est affecté par cette dernière à différents stades de croissance dans différentes régions du globe. Le pouvoir germinatif, la levée, l'établissement des peuplements des plantules, la croissance et les développements globaux, le développement pollinique, le

Introduction

développement de la soie, l'intervalle anthèse-soies, la pollinisation, le développement embryonnaire, le développement de l'endosperme et le développement du noyau sont les événements de la vie du maïs qui sont sérieusement entravés par le stress hydrique dû à la sécheresse. Le rendement en grains de maïs est aussi une des variables la plus sévèrement contrainte par la sécheresse qui se produit pendant ou peu avant la floraison ; la période la plus vulnérable pour le maïs (Magorokosho et *al.* 2003).

L'objectif de notre travail est de comparer le comportement des deux espèces céréalières : le maïs et le quinoa, sous stress oxydatif généré sous l'effet d'un stress hydrique par l'étude de quelques paramètres biochimiques tel que le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et la peroxydation lipidique à travers le dosage de malonedialdéhyde (MDA), ainsi le dosage des protéines totales, des polyphénols totaux, des flavonoïdes et la glycine bétaine.

Notre mémoire est présenté en trois chapitres :

-Le Chapitre I est une revue bibliographique sur :

- ❖ Le quinoa et maïs
- ❖ Les stress hydrique, osmotique et le stress oxydatif
- ❖ Les espèces réactives de l'oxygène
- ❖ Les antioxydants

-Le Chapitre II est l'ensemble des matériels et méthodes utilisés pendant notre expérimentation.

-Le Chapitre III est l'ensemble des différents résultats et discussions des paramètres étudiés.

Finalement une conclusion.



**CHAPITRE I:
REVUES
BIBLIOGRAPHIQUES**

I. Présentations des espèces :**1/ Le quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) :****1.1. Description :**

Le quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) est une plante herbacée annuelle de la famille des Amaranthaceae (Herbillon M., 2015).

Elle est actuellement considérée comme une «Pseudocéréale» puisqu'elle appartient à la famille des Chenopodiaceae et non à celle des Poacées (Herbillon M., 2015). C'est une plante caractérisée par sa bonne valeur nutritionnelle et surtout par sa résistance considérable aux conditions défavorables du climat tel que, la sécheresse, la salinité et au froid et peut être cultivé à haute altitude dans les régions montagneuses (Maradini A. et al, 2015).

1.2. Classification scientifique:

Le quinoa appartient au genre *Chenopodium* qui contient environ 250 espèces.

On connaît environ 1800 variétés de quinoa (Sophie Foucault, 2014). Depuis 2009, une nouvelle classification dite phylogénétique (APG III) range le quinoa dans la famille des Amaranthaceae.

Tableau-1- : classification de *Chenopodium quinoa Willd*

Classification de Cronquist (1981)	
Règne	Plantae
Division	Magnoliophyta
Classe	Magnoliopsidae
Sous-classe	Caryophyllidae
Ordre	Caryophyllales
Famille	Chenopodiaceae
Genre	<i>Chenopodium</i>
Classification APG III (2009)	
Ordre	Caryophyllales
Famille	Amaranthaceae
Nom binomial	
<i>Chenopodium quinoa Willd.</i> , 1798	

1.3. Origine et histoire :

Le quinoa est une plante originaire de la région andine de l'Amérique du Sud, et plus précisément des alentours du lac Titicaca. Cette zone située entre le Pérou et la Bolivie. Selon des preuves historiques, le quinoa est domestiqué depuis plus de 7000 ans par les peuples andins. Les restes les plus anciens du quinoa ont été découverts à Ayacucho (Pérou), datant de plus de 5000 ans avant J.-C., et ceux de Chinchorro, dans le nord du Chili, remontent à 3000 ans avant JC.

Enfin, des traces ont été découvertes en Bolivie, datant de 750 ans avant JC. (Herbillon M., 2015). Le développement technique du quinoa a été avancé et distribué sur tout le territoire des Incas. Avec l'arrivée des Espagnols (Cercam, 2014). Au XVIe siècle, la culture et l'utilisation du quinoa ont considérablement diminué en raison de l'introduction de cultures européennes (blé et orge) (Lebonvallet S., 2008). A la seconde moitié du XXe siècle, Le quinoa est devenu un produit alimentaire populaire notamment dans l'Europe et en Amérique du Nord, Le nombre de pays la cultivant augmenté de 8 en 1980 à 95 en 2015, en plus que le nombre de centres de recherche qui étudient la culture de quinoa et effectuant des expériences est augmenter (Da cunha veloso A., 2016).

2. le maïs (*Zea mays L*) :

2.1. Description :

Le maïs (*Zea mays L.*) est une céréale herbacée annuelle, à tallage faible à nul, du genre *Zea*, appartenant à la famille des Poacées (Graminées) tribu des Maydes. C'est la seule espèce cultivée de ce genre et la seule de grande importance économique de la tribu. Comme la plupart des Poacées tropicales, le maïs présente un métabolisme photosynthétique de type C4 (le premier glucide formé comportant quatre atomes de carbone), qui confère à la plante une efficacité supérieure à celle des Poacées tempérées dans la conversion de l'énergie lumineuse (Gallais, 1984 ; Gay, 1984). C'est une plante de jours courts, dont les variétés tropicales sont souvent photopériodiques. Ce caractère oligogénique a pu être éliminé lors de l'adaptation de l'espèce aux latitudes tempérées.

2.2. Classification scientifique :**Tableau-2-** : classification de *Zea Mays*

Classification de cronquist(1981)	
Règne	Plantae
Sous-règne	Tracheobionta
Division	Magnoliophyta
Classe	Liliopsida
Sous-classe	Commelinidae
Ordre	Cypéales
Famille	Poacée
Sous-famille	Panicoideae
Super-tribu	Andropogonodae
Tribu	Andropogoneae
Sous-tribu	Tripsacineae
Genre	<i>Zea</i>
Espèce	<i>Zea mays</i>
Sous-espèce	<i>Zea mays</i> sub sp
Classification APG III	
Ordre	Poales
Famille	Poaceae

2.3. Origine et historique:

Le maïs est la seule plante d'importance cultivée dont l'ancêtre sauvage ne soit connu. Il est cultivé depuis des millénaires en Amérique centrale (Girard-Gret, 2002). Son origine est imprécise même si l'on s'accorde à penser que son évolution vers des formes modernes s'est essentiellement déroulée en Amérique centrale (Rouanet, 1984). Selon un grand nombre de chercheurs, cette céréale aurait été domestiquée plus précisément dans la région centrale du Mexique à partir de la teosinte locale.

2.4. Le stress :

Le mot stress fait référence à la réponse de l'organisme face aux situations agressives. Il s'agit de la « réponse au stress » qui permet d'agir et de réagir ; c'est-à-dire de s'adapter à un changement quelconque (Faye et al. 2003). Le stress est fondamentalement un concept de mécanique, défini par

les ingénieurs et les physiciens comme étant une force exercée par unité de surface d'un objet (Hobkinse, 2003). La définition du stress chez les plantes apparaît avec des significations différentes en biologie, qui convergent principalement en attribuant le stress à n'importe quel facteur environnemental défavorable pour une plante. Ces stress peuvent être provoqués par des organismes vivants –on parle de stress biotique– ou par des excès physiques ou chimiques de l'environnement on parle de stress abiotique (Chaumeil, 2006)

II. Le stress hydrique :

2. définition :

Le stress provoqué par un déficit hydrique est bien plus fréquent, de sorte que l'expression de stress de déficit hydrique est abrégée en stress hydrique. Comme le stress hydrique dans des environnements naturels est dû à l'absence de pluies, une condition dite de sécheresse, ce stress est appelé stress de sécheresse (Hopkins, 2003). Le stress hydrique occupe et continuera d'occuper une très grande place dans les chroniques agro-économiques (Mouellef, 2010). En région méditerranéenne, le stress hydrique peut intervenir à n'importe quel moment du cycle (Hafsi *et al.*, 2001). Les déficits hydriques qui affectent la culture, et le manque d'eau ou stress qui en résulte dans la plante, se répercutent sur l'évapotranspiration le rendement. Le manque d'eau dans la plante peut être exprimé quantitativement au moyen de la relation entre le taux d'évapotranspirations réelles (E_t) et le taux d'évapotranspiration maximum (E_{tm}) (Doorenbos, 1980).

Le stress hydrique se traduit chez la plante par une série de modifications qui touchent les caractères morphologiques, physiologiques et biochimiques, à partir du moment où les besoins en eau de la plante sont supérieurs aux quantités disponibles (Mefti *et al.*, 2001). Le déficit hydrique est la majeure contrainte environnementale qui affecte la production agricole mondiale, spécialement dans les zones aride et semi-aride (Chahbar *et al.*, 2016)

Stress hydrique Pour (Girardin, 1999) cité par (Pindard, 2000), il y a un stress chez la plante quand l'état hydrique perturbe le métabolisme. Cela sous-entend qu'il y a des répercussions directes plus ou moins rapides sur la croissance des organes et leur développement. La première manifestation du stress hydriques chez une plante est le flétrissement mais des recherches ont montré qu'on ne peut se baser sur le flétrissement du feuillage pour détecter le stress, car les fonctions métaboliques sont affectées chez une plante stressée avant que le stress ne soit visible. Il faut avoir recours à des mesures au niveau de la plante, du sol ou à des estimations (Pindard, 2000).

2. Les conséquences de stress hydrique :

La sécheresse, en tant que stress abiotique, est multidimensionnelle dans sa nature et affecte les plantes à différents niveaux de leur organisation. Le stress hydrique réduit le potentiel hydrique et la turgescence de la cellule végétale. Ceci a pour résultat une diminution de l'agrandissement cellulaire avec pour conséquence une inhibition de la croissance et une altération de la reproduction. S'ensuit une accumulation de l'ABA et d'osmolytes compatibles tels que la proline. A ce stade, la surproduction de ROS aggrave les conséquences du stress mais peut être atténuée par l'augmentation des activités anti-oxydantes (Mittler et *al.* 2004). La sécheresse affecte non seulement les relations hydriques de la plante à travers la réduction de la teneur en eau et de la turgescence, mais affecte également l'ouverture stomatique, limite les échanges gazeux, réduit la transpiration et l'assimilation de carbone. Les effets négatifs sur la nutrition minérale et le métabolisme conduisent à une réduction de la surface foliaire et une altération de la répartition des assimilats entre les organes. L'altération de l'élasticité de la paroi cellulaire et la perturbation de l'homéostasie et de la distribution des ions dans la cellule ont également été observées. La synthèse de nouvelles protéines et de mRNA associés à la réponse à la sécheresse est un autre résultat du stress hydrique chez les plantes.

3. les mécanismes de résistance contre le stress hydrique :

Afin de lutter contre le déficit hydrique, les plantes développent des stratégies qui varient en fonction de l'espèce et des conditions du milieu. La résistance d'une plante à une contrainte hydrique peut être définie, du point de vue physiologique, par sa capacité à survivre et à s'accroître et du point de vue agronomique, par l'obtention d'un rendement plus élevé que celui des plantes sensibles (Madhava Rao et *al.* 2006).

La résistance à la sécheresse est un terme générique qui comprend plusieurs processus. On en distingue classiquement quatre: L'échappement, la restauration, la tolérance à la déshydratation et l'évitement. Jones (1992) in (Kiani, 2007), a défini et établi une classification des 'stratégies' d'adaptation des plantes à la sécheresse : la première consiste à 'éviter' le stress hydrique et l'autre à le 'tolérer'.

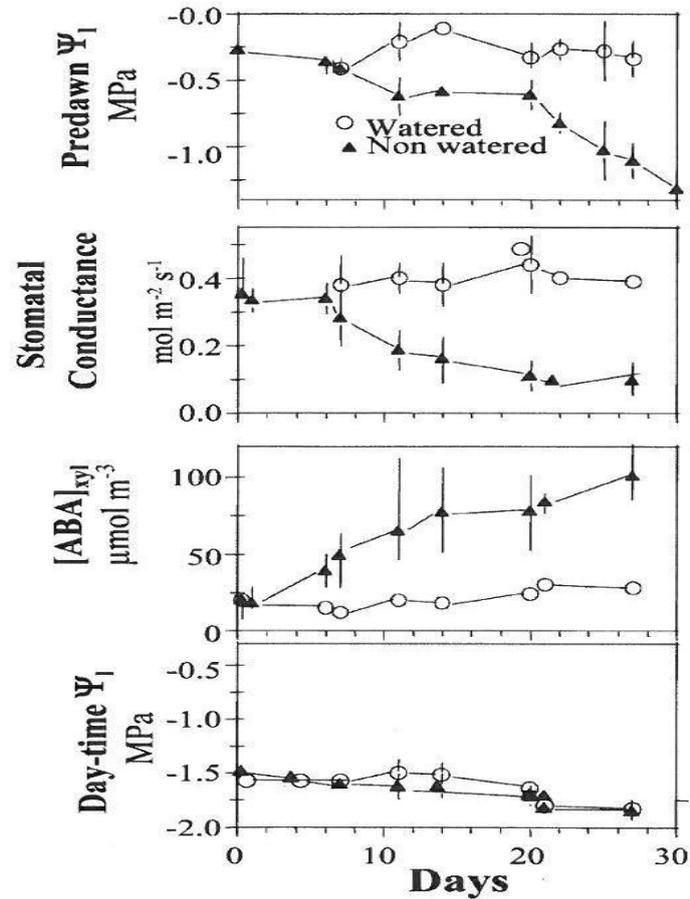


Figure 1 : Stratégie d'évitement. Maintien de l'état hydrique foliaire du maïs (*Zea mays*), plante isohydrrique, pendant un scénario de dessèchement du sol au champ (Tardieu 2005).

- a)** Potentiel hydrique foliaire de base, relié étroitement à l'état hydrique du sol : les plantes non irriguées ont été soumises à un déficit hydrique croissant. **b)** conductance stomatique, la conductance stomatique des plantes non irriguées a diminué. **c)** teneur en acide abscissique (ABA) dans la sève xylémienne : cette concentration a augmenté. **d)** potentiel hydrique foliaire (ψ_1), l'état hydrique foliaire diurne évalué par son potentiel hydrique est resté approximativement stable et ne différait pas significativement entre les plantes irriguées et non irriguées.

4. La relation entre stress hydrique et stress oxydatif :

Une conséquence du stress hydrique est l'apparition d'un stress oxydatif qui se définit comme le résultat d'un déséquilibre entre la balance des espèces réactives d'oxygènes (ERO) et les systèmes de défense (antioxydants), avec comme conséquence, l'apparition de dégâts souvent irréversibles pour la cellule. Un des mécanismes de défense est le développement d'un système de défense antioxydant, qui inclut les enzymes antioxydants dont le superoxyde- dismutase (SOD), la catalase (CAT), la gaïacol peroxydase (GPX), l'ascorbate peroxydase, etc. L'autre système antioxydant non enzymatique inclut le glutathion, l' α -tocophérol, la vitamine C, les caroténoïdes et les composés phénoliques. (Abdellaoui et al., 2016).

L'effet dépressif sur la photosynthèse résulte d'une baisse de la conductance stomatique, d'une altération de l'appareil photosynthétique et/ou d'une diminution de la surface foliaire et une diminution de la concentration interne en CO_2 de la feuille et une réduction de la photosynthèse (Ben Naceur et *al.*, 1999).

Lors d'un stress salin ou hydrique, l'inhibition de la photosynthèse, et plus précisément la fuite d'électrons due la diminution de la fixation du CO_2 , entraîne une forte accumulation d'espèces réactives de l'oxygène(ERO), et les peroxydases (POD) qui sont des enzymes jouant un rôle important dans le métabolisme et la physiologie de la plante. Elles sont présentes dans tous les tissus des végétaux et sont impliquées dans les réponses des plantes aux infections et aux stress abiotiques (Benkaddour, 2014). Le stress hydrique conduit à un stress oxydatif par production des espèces oxygènes réactives particulièrement le radical superoxyde et le peroxyde d'hydrogène (Zarrad *et al.*, 2009). Chez le blé, le déficit hydrique affecte les phénomènes stomatiques et les non stomatiques de la photosynthèse à la conductance stomatique. (Abousouan et *al.*, 1985).

III. le stress osmotique :

1. définition :

Le stress osmotique est une circonstance défavorable, qui dérange ou est susceptible de perturber le fonctionnement physiologique normal de la plante, qui affecte la croissance immédiatement et est causée par le sel à l'extérieur des racines (Munns et Tester, 2008). L'eau circule dans la plante du sol vers les feuilles où elle passe à l'état gazeux au niveau des parois cellulaires des cellules du mésophylle avant de s'échapper dans l'air en traversant l'épiderme, principalement par les stomates. Cette circulation dépend du gradient de potentiel hydrique.

2. les effets du stress osmotique :

Le statut altéré de l'eau conduit à la réduction de la croissance initiale et de la limitation de la productivité végétale. Par l'effet perte d'eau, le stress osmotique affecte tous les processus importants chez la plante tels que le changement de conductivité hydraulique des tissus, le mouvement des stomates, la photosynthèse ou encore la croissance, etc.

2.1. Effet du stress osmotique sur le changement de conductivité hydraulique des tissus :

La plante est capable de contrôler l'absorption d'eau en ajustant la conductivité hydraulique de la membrane plasmique. Les aquaporines sont des protéines membranaires qui permettent un passage rapide des molécules d'eau d'un compartiment à l'autre. Cette fonction s'effectue par ouverture ou fermeture des pores associés à ces protéines. Chez la plante, les aquaporines sont les principaux facteurs qui exercent le contrôle sur la conductivité hydraulique tissulaire. Elles sont adaptées tant à

des conditions de sécheresse que d'inondation, elles sont impliquées dans la préservation des réserves d'eau ou dans l'évacuation des excédents d'eau présents dans la plante (Cochard *et al.*, 2007).

3. L'ajustement osmotique :

L'ajustement osmotique chez les plantes se réfère au maintien de la turgescence par abaissement du potentiel osmotique via l'accumulation de solutés en réponse au déficit hydrique (Guei *et al.*, 1993). Lorsque le potentiel hydrique foliaire décroît, le potentiel de turgescence, la conductance stomatique et l'activité photosynthétique sont maintenus grâce à l'accumulation intracellulaire des solutés. L'ajustement osmotique intervient aussi dans le retardement de la sénescence foliaire et dans l'amélioration de l'extraction de l'eau par les racines (Turner *et al.*, 2001). L'ajustement osmotique se produit via l'absorption et la synthèse de différents osmoprotecteurs par la plante. Dans la partie qui suit nous discuterons de deux acides aminés jouant le rôle d'osmoprotecteurs cellulaires, la GB et la proline.

3.1. La glycine bêtaïne :

La glycine-bêtaïne (N, N, N-triméthylglycine) est un composé amphotère, électriquement neutre à différents pH physiologiques, extrêmement hydrosoluble mais contient toutefois une moitié non polaire représentée par les trois groupements méthyl. Ses propriétés moléculaires lui permettent d'interagir avec les domaines hydrophiles et hydrophobes des macromolécules comme les enzymes et les complexes protéiques (Sakamoto *et al.*, 2002). En condition de stress, la glycine-bêtaïne est considérée comme l'osmoprotecteur le plus efficace, capable d'améliorer la disponibilité en eau (Gabbay-Azaria *et al.*, 1998) et de protéger les enzymes de croissance et de photosynthèse (Sakamoto *et al.*, 2002). La glycine-bêtaïne protège aussi les membranes du froid, des hautes températures et du sel et prévient la dissociation des polypeptides extrinsèques du photosystème II (PSII) en présence de hautes concentrations de sel (Murata *et al.*, 1992).

D'après Sakamoto et Murata (2002), la glycine-bêtaïne est synthétisée selon deux voies : au niveau chloroplastique suite à deux oxydations successives à partir de la choline. La première oxydation de la choline en bêtaïne aldéhyde est assurée par la choline monooxygénase (CMO). La bêtaïne aldéhyde est à son tour oxydée par la bêtaïne aldéhyde déshydrogénase (BADH) pour enfin produire la glycine-bêtaïne. Cette voie est privilégiée en situation de stress. En conditions normales, la glycine-bêtaïne serait issue de trois méthylations successives de la glycine.

IV. le stress oxydatif :

1. définition :

Le stress oxydatif désigne un déséquilibre entre l'apparition d'espèces réactives de l'oxygène et les mécanismes de détoxification ou de réparation à l'intérieur de l'organisme (Roma-Mateo et *al.*, 2015). La perturbation de l'état d'oxydoréduction normal des cellules produit des peroxydes toxiques et des radicaux libres qui endommagent les lipides cellulaires, les protéines et l'ADN.

Oxydation provenant du métabolisme oxydatif peut briser les brins d'ADN et causer des dommages sous-jacents. Les dommages indirects des espèces réactives de l'oxygène (ROS) se produisent en générant des radicaux hydroxyles, des radicaux superoxydes et du peroxyde d'hydrogène et du peroxyde d'hydrogène (Bhattacharya, 2008). Le stress oxydatif peut perturber la signalisation cellulaire normale, car certaines espèces oxydatives réactives agissent également en tant qu'agents pathogènes. Espèces oxydatives réactives agissent également comme messagers cellulaires dans la signalisation redox (Bhattacharya, 2008).

2. les conséquences du stress oxydatif dans la plante :

Aux cours du stress oxydant, les ERO sont des molécules réactives et certaines d'entre elles, telles que le H_2O_2 , qui peuvent même diffuser à travers les membranes (Bérubé et *al.* 2000).

Alors, les ERO peuvent causer de graves dommages à des composantes importantes de la cellule. Les cibles des ERO sont principalement les protéines, les lipides membranaires ainsi que l'ADN (Perez et *al.* 2000). La production excessive de radicaux libres provoque des lésions directes de molécules biologiques (oxydation de l'ADN, des protéines, des lipides, des glucides), mais aussi des lésions secondaires dues au caractère cytotoxique et mutagène des métabolites libérés notamment lors de l'oxydation des lipides (Favier, 2003).

2.1. Les conséquences du stress oxydatif aux lipides :

Les ERO peuvent attaquer les lipides et plus particulièrement les résidus d'acides gras polyinsaturés des phospholipides facilement oxydables. Ceci conduit à une réaction en chaîne de peroxydase lipidique qui modifie la fluidité et la perméabilité de la membrane et peut aussi altérer le fonctionnement des protéines membranaires (Kœchlin, 2006).

2.2. Les conséquences du stress oxydatif aux protéines :

Les protéines sont sensibles aux attaques radicalaires surtout celles qui comportent un groupement sulfhydryle (SH) et les ponts disulfures. C'est le cas de nombreuses enzymes cellulaires et protéines de transport qui vont ainsi être oxydées et inactivées. Les protéines modifiées par oxydation perdent leurs propriétés biologiques et deviennent beaucoup plus sensibles à l'action des protéases et notamment du protéasome (Garait, 2006)

V. Les Espèces Réactives de l'Oxygène :

1. définition :

Les espèces réactives de l'oxygène (ERO) sont utilisées pour la description des formes d'oxygène qui sont énergétiquement plus réactives que l'oxygène moléculaire. Parfois, elles sont appelées espèces oxygénées actives (EOA). Elles regroupent l'ensemble des dérivés radicalaires de l'oxygène mais également d'autres composés non radicalaires très réactifs

(Foyer et Noctor, 2003 ; Edreva, 2005).

Certaines espèces réactives de l'azote (ERA ou RNS en anglais pour *Réactive Nitrogène Species*) sont parfois mentionnées comme appartenant à cette classification puisqu'elles possèdent un atome d'oxygène et qu'elles se comportent de manière similaire (espèces généralement radicalaires, pouvoir oxydant important, générées et régulées par l'organisme) aux ERO vis-à-vis du stress oxydant (Smirnov, 2005).

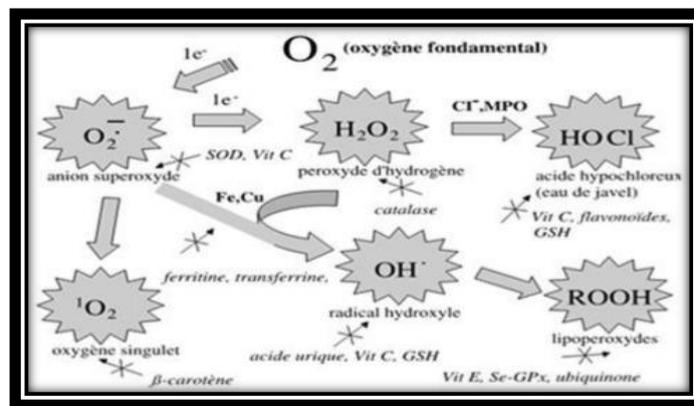


Figure 2: Aperçu des différentes espèces réactives de l'oxygène (ERO) et des antioxydants régulateurs de leur production (Haleng et al., 2007).

3. les radicaux libres :

Les radicaux libres sont des espèces chimiques qui existent indépendamment et contiennent des électrons non appariés, parmi lesquelles on peut trouver le radical superoxyde ($O_2^{\cdot-}$), le radical perhydroxyle (HO_2^{\cdot}), le radical hydroxyle ($\cdot OH$), le radical pyroxyde (RO_2^{\cdot}) et le radical alkoxyde (RO^{\cdot}). Certains radicaux libres n'ont pas d'atomes d'oxygène (comme les métaux de transition ou les radicaux centrés sur le carbone). Les ERO favorisent le stress oxydatif par oxydation des composés cellulaires. Le terme « stress oxydatif » a plusieurs significations. Tout d'abord, c'est l'état physiologique où la perte des électrons (oxydation) dépasse la quantité des électrons acquise (réduction) entraînant des dommages chimiques oxydatifs des composés cellulaires. Le stress oxydatif est donc associé à un déséquilibre redox (réduction/oxydation) sévère et à long terme, dû au manque d'électrons. Deuxièmement, il s'agit d'un des facteurs de stress associé à plusieurs types de

stress d'origine biotique ou abiotique, qui endommage les cellules et déclenche des réactions de signalisation et de défense. Ces définitions sont liées et peuvent être combinées (Demidchik, 2014).

2.1. Sources :

2.1.1. Sources endogènes :

Parmi Les réactions enzymatiques, plusieurs sont considérées comme source principale les espèces réactives d'oxygène (ROS) incluant : NADPH oxydase, lipoxygénase, xanthine oxydase (enzyme dans le foie). La mitochondrie est un élément fondamental pour le fonctionnement de la cellule, c'est au niveau de cet organite que s'effectue la respiration cellulaire. La consommation de l'oxygène et les différentes réactions du transfert des électrons (énergie) produisent en performance les espèces réactives d'oxygène. Les ions métalliques présents dans l'organisme ex ; fer cuivre, peuvent coopérer avec des espèces moins réactives pour produire des radicaux hydroxyles (Poprac et *al.*, 2017).

2.1.2 Sources exogènes :

Les ROS sont également générées sous l'effet de stress environnementaux comme la pollution, la consommation d'alcool ou certains médicaments, l'exposition prolongée au soleil, l'effort intense ainsi que le tabagisme. (Kalam et *al.*, 2015). Dans les phénomènes de stress oxydant prenant place dans les milieux biologiques, les radicaux libres qui interviennent, partagent pour caractéristique celle d'avoir un électron célibataire sur un atome d'oxygène ou d'azote. Ceci leur confère la dénomination d'espèces réactives de l'oxygène (EOR ou ROS) ou de l'azote (EAR ou RNS) (Tableaux 3 et 4) (Weidinger et *al.*, 2015).

Tableau 3 : Espèces réactives d'oxygène d'intérêt biologique

Espèces réactives	Symbole	Réactivité
Radical superoxyde	$O_2 \bullet-$	Généré dans les mitochondries et dans le système cardiovasculaire.
Radical hydroxyle	$HO\bullet$	Très réactif, généré lors d'une surcharge de fer
Peroxyde d'hydrogène	H_2O_2	Formé dans notre corps par un grand nombre de réactions et produit des espèces puissantes comme $HO\bullet$
Radical peroxy	$ROO\bullet$	Réactif et formé à partir de lipides, de protéines, d'ADN, de sucres etc. pendant les dommages oxydatifs
Hydro-peroxyde Organique	$ROOH$	Réagit avec des ions métalliques transitoires pour produire des espèces réactives
L'oxygène singulet	1O_2	Très réactif, formé lors de la photosensibilisation et certaines réactions chimiques
Ozone	O_3	Peut réagir avec diverses molécules pour former l'oxygène singulet 1O_2

Tableau 4 : Espèces réactives d'azote d'intérêt biologique.

Espèces réactives	Symbole	Réactivité
Oxide nitrique	NO●	Neurotransmetteur et régulateur de pression sanguine, peut produire des oxydants puissants pendant les états pathologiques
Peroxyinitrite	ONOO	Formé de NO● et superoxyde, hautement réactif
Acide peroxyinitrique	ONOOH	Forme protonée de ONOO
Dioxyde d'azote	NO2	Formé lors de la pollution par le dioxyde Atmosphérique

On distingue deux grands groupes de molécules réactives impliquées dans le stress oxydant : les espèces radicalaires et les espèces non-radicalaires (Valko *et al.*, 2016; Lushchak., 2014). La réactivité d'un radical libre varie d'un radical à un autre et dépend de l'environnement où il se trouve (Kehrer *et al.*, 2015).

3. Les mécanismes de résistance contre les espèces réactives de l'oxygène :

Les plantes possèdent des mécanismes leur permettant de limiter la production d'ERO lors de leurs processus métaboliques. Certaines plantes se sont adaptées, au cours de l'évolution, à des conditions particulières du milieu, et ont développé des aptitudes métaboliques leur permettant de limiter la saturation des CTE. Citons par exemple les métabolismes C₄ et CAM des plantes grasses, la possibilité de mettre en dormance l'appareil photosynthétique lors des saisons sèches par des régulations post-transcriptionnelles ou encore des adaptations morphologiques des feuilles (Mittler *et al.*, 2001 ; Mittler, 2002). Les plantes possèdent également de nombreux composés et enzymes leur permettant d'empêcher la production d'ERO ou de la contrôler (Pourrut, 2008).

VI. Les antioxydants :

Les antioxydants sont des agents redox qui réagissent avec les oxydants et soit stoppent, soit ralentissent les processus d'oxydation (Leopoldini et *al.*, 2011).

Les composés réduits de l'oxygène ont une chimie très étendue, ils sont à l'origine d'effets mutagènes et entraînent des altérations sur les protéines et les lipides. Pour faire face à ces inconvénients et diminutions, Ces mécanismes peuvent être divisés en deux catégories selon qu'ils impliquent des enzymes de façon directe ou indirecte (Sofa et *al.*, 2004).

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

1. Les antioxydants enzymatiques et leurs systèmes :

Il s'agit principalement de trois enzymes, le superoxyde dismutase (SOD), la catalase (CAT) et la glutathion peroxydase (GPx). Ces enzymes ont une action 15 complémentaire sur la cascade radicalaire au niveau du O •- et du H O, conduisant 222 finalement à la formation de l'eau et de l'oxygène moléculaire (Lehucher-Michel et *al.*, 2001).

1.1. La Superoxyde dismutase (SOD) :

Comme l'indique son nom, la superoxyde dismutase (SOD) accélère la dismutation de l'anion superoxyde en peroxyde d'hydrogène, Il existe plusieurs isoenzymes de SOD ; SOD ferreux (Fe-SOD), SOD à cuivre (Cu-SOD) et SOD à manganèse (Mn-SOD) qui diffèrent selon la localisation chromosomique du gène, leur contenu métallique, leur structure quaternaire et leur localisation cellulaire (Zelko et *al.*, 2002).

1.2. La catalase (CAT) :

Chez les céréales, le comportement de la catalase a été étudié en présence de conditions de stress (Kim et *al.*, 2005 et Khosravinejad et *al.*, 2008). Elle agit en synergie avec la SOD puisque son rôle est d'accélérer la dismutation du peroxyde d'hydrogène en eau et en oxygène moléculaire (Sorg, 2004). La catalase peut donc être considérée comme une enzyme majeure pour améliorer la qualité germinative des céréales (Zahid, 2010).

1.3. Les glutathions peroxydases (GPx) :

Les GPX sont fortement induites par l'ensemble des stress abiotiques (Gimeno et *al.* 2009). La GPX joue un rôle important les défenses oxydatives de la plante. Son rôle reste régulier mais secondaire dans la mobilisation du H₂O₂ à cause de la faible capacité à éliminer les EOA comparativement à la CAT (Gondim et *al.* 2012). En effet, elle utilise le GSH comme réducteur afin de pouvoir réduire les

hydroperoxydes organiques et le H₂O₂ et ainsi permettre une meilleure adaptation au stress oxydatif (Gill et Tuteja, 2010).

1.4. La thiorédoxine (TRX)

Cet enzyme a une structure proche de celle de la glutathion réductase. Il consomme du NADPH dans son fonctionnement. Il joue un rôle protecteur contre une grande variété de stress oxydants grâce à ses propriétés de capture des radicaux libres. Des données biochimiques montrent que les thiorédoxines réduisent des protéines clefs pour le développement, la division cellulaire ou la réponse au stress oxydant (Reichheld et *al.*, 2005).

1.5. Le malondialdéhyde (MDA) :

Le malondialdéhyde (MDA), produit terminal de la dégradation des lipides et dont la teneur est en relation étroite avec les dégradations de la membrane cellulaire, permet de monter l'effet d'une pénétration d'un xénobiotique dans l'organisme (Ladhar-Chaabouni et *al.*, 2007).

La MDA un indice peu représentatif de la présence d'une peroxydation lipidique puisqu'elle ne représente qu'un pourcent des produits de décomposition des peroxydes lipidiques (Pincemail et *al.*, 1999).

1.5.1. Intérêt du dosage du malondialdéhyde (MDA) :

Ce paramètre constitue un indicateur précoce d'une agression toxique et par conséquent il peut être utilisé comme biomarqueur du stress oxydatif (Funes et *al.* 2006). Les radicaux libres en particulier les radicaux hydroxyles, sont susceptibles d'interagir au niveau des doubles liaisons C=C avec les chaînes d'acides gras polyinsaturés qui constituent le double feuillet phospholipidique des membranes (Bonfont-Rousselot, 2003). Ils entraînent alors la peroxydation des acides gras polyinsaturés (Gutteridge et Halliwell, 1990) provoquant une désorganisation membranaire pouvant aboutir à la lyse cellulaire. Les hydroperoxydes lipidiques formés sont dégradés en malondialdéhyde (MDA) (Chaudhary et *al.* 1996) qui réagissent de manière covalente avec les protéines et les inactivent.

2. les antioxydants non enzymatiques :

Ce sont des antioxydants apporté par l'alimentation ce sont des molécules de petite taille tel que (glutathion, acide urique, bilirubine, glucose, vitamines A, C, E, ubiquinone, caroténoïdes, flavonoïdes) (Belbachir, 2019).

2.1. Les polyphénols :

Les polyphénols sont des métabolites secondaires, d'un poids moléculaire élevé. Ils sont largement distribués dans le règne végétal (Haslam, 1993). La structure de base qui les caractérise est la présence d'un ou plusieurs noyaux aromatiques auquel sont directement liés un ou plusieurs groupements hydroxyle libres ou engagés dans une autre fonction (éther, ester) (Harborne, 1994).

Les polyphénols sont synthétisés à partir des métabolites primaires via deux voies: (1) la voie de l'acide shikimique qui conduit des carbohydrates aux acides aminés aromatiques (phénylalanine, tyrosine) dont la désamination conduit aux acides cinnamiques et à leurs dérivés, (2) la voie de l'acétate qui synthétise des poly- β -cétoesters de longueur variable (Forkmann, 1993; Harborne, 1994).

Les polyphénols naturels regroupent un vaste ensemble de substances chimiques comprenant au moins un noyau aromatique, et un ou plusieurs groupes hydroxyles, en plus d'autres constituants. Ils peuvent aller de molécules simples, comme les acides phénoliques, à des composés hautement polymérisés, de plus de 3000 Dalton, comme les tannins. Les acides phénoliques, les tannins et les flavonoïdes constituent les classes majeures des polyphénols.

3.1.1. Les flavonoïdes :

Les flavonoïdes représentent une classe de métabolites secondaires largement répandus dans le règne végétal. Ce sont des pigments quasiment universels des végétaux qui sont en partie responsables de la coloration des fleurs, des fruits et parfois des feuilles. Ils constituent un groupe de plus de 6000 composés naturels du règne végétal (Ghedira, 2005), qui sont caractérisés par la présence d'une structure phénolique dans leur molécule, et même d'une structure flavone ce qui les distingue des autres polyphénols. Actuellement, plus de 9000 flavonoïdes ont été répertoriés et il en reste des milliers d'autres à découvrir puisque le squelette des flavonoïdes peut être substitué par différents groupements comme des groupements hydroxy, méthoxy, méthyl, benzyl et isoprényl (Kueny-Stotz, 2008).

2.1.1.1. Structure chimique des flavonoïdes :

Les flavonoïdes ont un poids moléculaire faible se présentant en 15 atomes de carbone arrangés comme suit : C₆-C₃-C₆ (Figure 3). Elles sont composées de deux noyaux aromatiques A et B, liés par un pont de 3 carbones souvent sous forme d'un hétérocycle. Les substitutions variées au sein de la molécule donnent les différentes sous-classes de flavonoïdes. Les flavones et les flavonols sont les plus connus et les plus divers sur le plan structural.

Les substitutions touchant les noyaux A ou B qui peuvent survenir dans chaque classe des flavonoïdes sont : une oxydation, alkylation, glycosylation, acylation, et sulfonation.

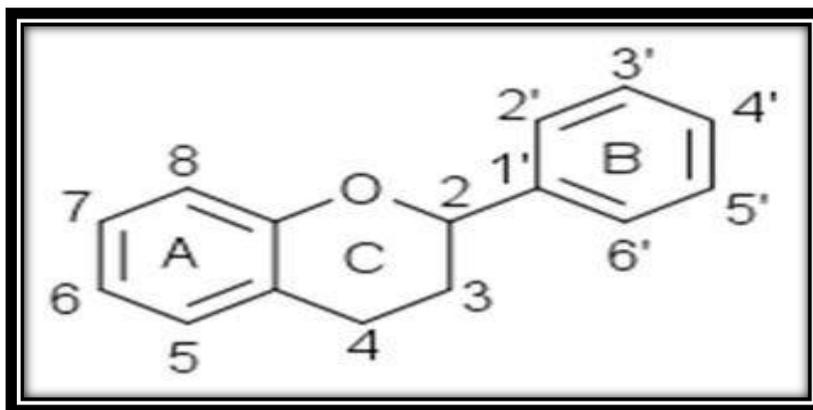


Figure 3: Structure générale des flavonoïdes (Tim Cushnie et Lamb, 2005)

2.1.1.2. Classification des flavonoïdes :

Plus de 5000 variétés de flavonoïdes ont été identifiés et peuvent classer selon leur structure sur la base du degré de substitution et l'oxydation (Yao LH et *al.*, 2004).

Les flavonoïdes prédominants sont divisés en six sous-classes : Les flavones, les flavonols, flavan-3-ols, les flavanones, les isoflavones et anthocyanidines (Karabin M et *al.*, 2015).

Tableau 5 : Les principales classes des flavonoïdes (Karabin M et *al.* 2015).

Classe	Structure	Exemple
Les flavons		Apigénine
Les flavonols		Quercétine
Flavan-3-ols		Catéchine
Les flavanones		Naringénine
Isoflavonones		Génistéine
Anthocyanidines		Cyandine

2.1.1.3. Activités biologiques des flavonoïdes :

Les flavonoïdes sont une classe de composés ubiquitaires dans les plantes vasculaires et représentent un des plus grands groupes de produits phénoliques naturels. Ils interviennent dans la pigmentation des fleurs, la protection des plantes contre les radiations UV de type B et leur défense contre les herbivores et les attaques microbiennes (Harborne *et al.* 2000 ; Waridel, 2003).

De nombreux polyphénols ; les flavonoïdes et d'autres composés phénoliques sont des molécules complexes et ont des actions potentielles multiples, ils sont capables de se fixer sur certaines protéines et enzymes et de modifier les équilibres enzymatiques (Halliwell, 2007). En règle générale, les composés phénoliques sont des inhibiteurs enzymatiques (Middleton *et al.* 2000) en ont le pouvoir d'inhiber plusieurs enzymes tel que la télomérase, glutamate dehydrogenase, cyclooxygénase, lipoxygénase, xanthine oxydase, la matrice metalloproteinases, cytochrome P450 et les activités d'enzyme sulphotransférase, en affectant des sentiers de transduction de signal et le fait d'interagir en avec sirtuins (Mandel *et al.* 2006 ; Zini *et al.* 2006).

2.1.2. Les tanins :

Les tanins sont des polyphénols que l'on trouve dans de nombreux végétaux tels que les écorces d'arbre et les fruits (raisins, dattes, café, cacao...). Leur structure complexe est formée d'unités répétitives monomériques qui varient par leurs centres asymétriques et leur degré d'oxydation (Hemingway, 1992). Ils ont la capacité de former des complexes avec des macromolécules (les protéines ...) et des liaisons entre les fibres de collagènes Leur structure chimique est particulièrement variable, mais comporte toujours une partie polyphénolique. Il existe deux catégories de tanins, d'origine biosynthétiques différentes : les tanins hydrolysables et les tanins condensés (Paolini *et al.*, 2003).

2.1.3. Les anthocyanes :

Ces molécules font partie de la famille des flavonoïdes et sont capables d'absorber la lumière visible. Ce sont des pigments qui colorent les plantes en bleu, rouge, mauve, rose ou orange. Leur présence dans les plantes est donc détectable à l'œil nu. A l'origine de la couleur des fleurs, des fruits et des baies rouges ou bleues, elles sont généralement localisées dans les vacuoles des cellules épidermiques, qui sont de véritables poches remplies d'eau. On trouve également les anthocyanes dans les racines, tiges, feuilles et graines (Bessas *et al.*, 2007).

3. Mécanisme d'action des antioxydants :

Il est connu que certaines propriétés pharmacologiques des polyphénols sont dues à leur activité antioxydante (Morton *et al.*, 2000). De nombreux composés phénoliques réagissent avec les radicaux libres (Bagchi *et al.*, 1998), empêchant ainsi les dégradations liées à leur intense réactivité au niveau

des phospholipides membranaires (Halliwell et Aruoma, 1993).

En plus de l'inhibition des oxydases, l'activité antioxydante des polyphénols est due à leur capacité de capter les radicaux libres et/ou de chélater les ions métalliques du fer et du cuivre (Halliwell, 2007). De plus, la régénération de l' α -tocophérol par réduction du radical α -tocophéryl contourné à leur activité antioxydante. Les flavan-3-ols peuvent régénérer l' α -tocophérol par le transfert d'un atome d'hydrogène, radical a-tocopheryle (Miura *et al.* 1994).

Les flavonoïdes exercent des effets pharmacologiques multiples sur les cellules et les tissus des mammifères, leur principale activité est une propriété vitaminique. Ils ont d'abord été décrits comme des substances protectrices de la paroi capillaire et de maintien de sa résistance (Formica et Regelson, 1995). D'autres activités biologiques ont été attribuées aux flavonoïdes, citons à titre d'exemple les activités anti-inflammatoires, anti-allergiques, anti hypertensives (Rice-Evans, 2001), antivirales (Nijveldt *et al.*, 2001 ; Narayana *et al.*, 2001), antifongiques, anti bactériennes, anti cancéreuses (Yang *et al.*, 2000) et anti-ulcéreuse (Di Carlo *et al.*, 1993). Ces activités sont attribuées en partie aux propriétés anti-oxydantes de ces composés naturels. Les flavonoïdes expriment ces propriétés par : (1) le piégeage direct des ROS, (2) la suppression de la formation des ROS par l'inhibition de quelques enzymes ou par chélation des ions métalliques impliqués dans la production des ROS via les réactions de Fenton et Haber Weiss, et (3) la protection des systèmes de défense antioxydants de l'organisme (Cotelle, 2001).

Les flavonoïdes, les acides phénoliques sont de puissants antioxydants, ils exercent leur effet par capture des ROS et des espèces réactives dérivés de l'azote (Morton *et al.*, 2000).

Le pouvoir des polyphénols, et particulièrement des flavonoïdes, d'inhiber la peroxydation des lipides est lié à leur structure moléculaire. La présence d'un groupement orthodihydroxyle sur le noyau 13, la double liaison en C2-C3 en conjugaison avec une fonction cétone en C4 et des groupements hydroxyles en C3 et C5 sont les caractéristiques structurales principales pour une activité antioxydante (Rice-Evans, 1996). Par ailleurs, la glycosylation et la méthylation tendent à diminuer l'effet inhibiteur des polyphénols (Nakayama *et al.*, 1992).



CHAPITRE II : **Matériel et méthodes**

1. Matériel végétal :

Le matériel végétal choisi est deux espèces céréalières de différentes origines, le maïs et le quinoa, les semis ont été faites le 20/02/2022, on a mis les graines de chaque espèce dans de le coton pour accélérer la germination. Lorsque les plantes ont atteint une longueur de 30 a 40cm, on a séparé chaque espèce en deux blocs, premier bloc témoin et le deuxième on lui a fait subir un stress hydrique pendant une période de 10 jours.

Tableau 6 : variétés et origines des deux espèces

Espèces	Variétés	Origines
Quinoa	Ammarella sacaca	Pérou
Mais	Farello R1	France

**Figure 4** : germination des grains**Figure 5**: le quinoa témoin et stressé**Figure 6**: le maïs témoin**Figure 7**: le maïs stressé

2. Mise en expérimentations :

2.1. Dosage de peroxyde d'hydrogène H₂O₂:

- La solution végétale (0.1 g de feuilles et 5 ml d'acide Trichloracétique TCA à 1%).
- La solution végétale est broyée dans un bain à glace. L'homogénat est centrifugé à 12000 g pendant 15 min.
- 0.5ml du surnageant sont mélangés à 0.5 ml de régulateur (phosphate de potassium (KOH) et 1 ml d'iode de potassium (KI).
- La D.O est lue à 390 nm à l'aide d'un spectrophotomètre.
- La concentration du H₂O₂ est déterminée en utilisant l'équation suivante : DO / 0.04.



Figure 8 : Dosage de peroxyde d'hydrogène H₂O₂

2.2. Dosage de malonedialdéhyde (MDA):

- 50mg de poids secs de feuilles sont broyées dans un mortier-pilon broyées puis homogénéisés dans 2 ml d'acide Trichloracétique (TCA) à 1%.
- L'homogénat est centrifugé à 15000 g pendant 10 min à 4°C.
- 0.6ml du surnageant.
- 1.60ml d'acide Thio barbiturique (TBA) préparé dans du TCA à 20%.
- Les échantillons ont été incubés à 90°C pendant 20 min.

Après l'arrêt de la réaction dans la glace:

- Les échantillons sont centrifugés à 10000 g pendant 5 min.

Chapitre II : Matériel et méthode

- La D.O est lue à 532 nm à l'aide d'un spectrophotomètre.
- La concentration du MDA est déterminée en utilisant le coefficient d'extinction 155 /Mm/cm.

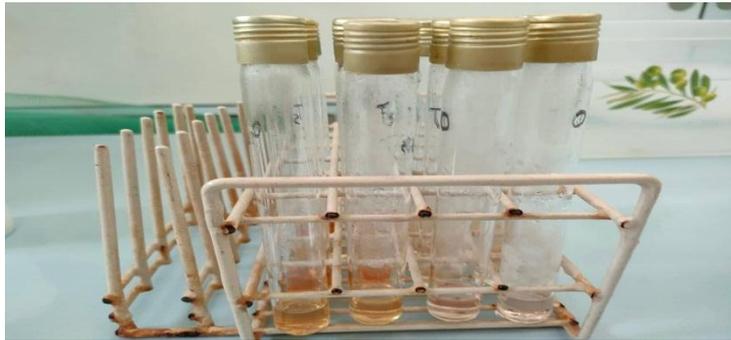


Figure 9: dosage de malonedialdéhyde MDA

2.3. Dosage de protéines totales:

➤ Extraction :

0,25g de feuilles fraîches a été homogénéisé dans 5 ml. (50 mM) de tampon phosphate de potassium (pH 7,8) dans un bain de glace et centrifugé le mélange à 12 000 g pendant 20 minutes à 4 °C. Le surnageant a été séparé en vue de la détermination des protéines solubles totaux et des acides aminés libres (Aziz et *al.*, 2017).

➤ Technique de dosage :

Les protéines ont été estimées selon la méthode de Bradford (1976). Une aliquote 2 ml. Du réactif de Bradford (on homogénéise 100mg de BBC (Bleu Brillant de Commassie) dans 50ml d'éthanol 95°C. On y ajoute ensuite 100ml d'acide ortho phosphorique à 85% et on complète à 1000ml avec de l'eau distillée) et 100 pl. Les échantillons ont été ajoutés dans un tube à essai. Manicrus pendant 20 min à température ambiante et l'absorbance lu à 595 nm.



Figure 10 : dosage des protéines

2.4. Dosage polyphénols:

Le dosage des polyphénols a été réalisé sur les feuilles. 100 mg des parties prélevées sont pesés, broyés dans 5 ml d'éthanol à 95°, puis centrifugés à l'aide d'une centrifugeuse de type MLW à 3000 tours/mn. Le surnageant récupéré a été utilisé pour le dosage des polyphénols.

Le dosage des polyphénols totaux est réalisé selon la méthode décrite par Chandler et Dodds modifié par Shety et al (2004).

La méthode de Folin-Ciocalteu a été choisie pour doser les polyphénols pour les raisons suivantes ; (i) c'est une méthode qui satisfait aux critères de faisabilité et de reproductibilité, (ii) la disponibilité du réactif de Folin et la méthode est bien standardisée, (iii) la grande longueur d'onde (725nm) d'absorption du chromophore permet de minimiser les interférences avec la matrice d'échantillon qui est souvent coloré, (iv) c'est un test largement pratiqué dans les laboratoires de recherche d'antioxydants des plantes médicinales .

En milieu alcalin, les polyphénols réduisent l'acide phosphomolybdique du réactif Folin-Ciocalteu. Cette réduction se traduit par l'apparition d'une coloration bleu foncée. (Ribéreau-Gayon, 1968)

A 1mL du surnageant sont ajoutés : 1 ml d'éthanol 95°, 1 ml d'eau distillée, et 500 µL de réactif de Folin ciocalteau à 50 % Après 5 mn de réaction, 1 ml de solution de carbonate de sodium (NaCO₃) à une concentration de 5 % est ajoutée. La lecture de l'absorbance a été réalisée à 725 nm à l'aide d'un spectrophotomètre (UV-visible 8500) après 60 mn d'incubation à température ambiante.

La détermination de la teneur en polyphénols a été faite en se référant à une courbe étalon dressée à partir d'une série de solutions standard d'acide gallique à 1 mg/ml.



Figure 11 : dosage des polyphénols

2.5. Dosage des flavonoïdes :

Le dosage des flavonoïdes a été réalisé sur les feuilles. 100 mg des parties prélevées sont pesés, broyés dans 5 ml d'éthanol à 95°, puis centrifugés à l'aide d'une centrifugeuse de type MLW à 3000 tours/mn. Le surnageant récupéré a été utilisé pour le dosage des flavonoïdes.

L'analyse quantitative des flavonoïdes est réalisée par le dosage spectrophotométrique selon la méthode décrite par Kim et *al.*, (2003).

Dans des tubes à essai, sont déposés 500 μ L de surnageant (dissout dans l'éthanol à raison de 50 mg/2,5 ml d'éthanol), 1500 μ L d'eau distillée, et 150 μ L de nitrate de sodium NaNO₂ à 5 % (m/v) dans l'eau. Après 5 minutes sont ajoutées : 150 μ L de trichlorure d'aluminium AlCl₃ à 10 % (m/v). Après 11 min de réaction, l'addition de 500 μ L de soude NaOH (1M) donne une coloration rose qui absorbe à 510 nm.

La teneur en flavonoïdes de l'extrait éthanolique est déterminée par interpolation à l'aide d'une courbe étalon réalisée par des solutions ascendantes de catéchine.



Figure 12 : dosage des flavonoïdes

2.6. Dosage de la glycine bétaine :

0,5g du matériel végétal sec finement broyé, on a ajouté 20 ml d'eau distillé, la solution obtenue a été incubée pendant 48h à 25°C. Les échantillons sont ensuite filtrés et le filtrat est stocké au congélateur jusqu'à l'analyse. Les extraits décongelés ont été dilués 1: 1 avec de l'acide sulfurique 2 N. 0,5 ml de la solution obtenue a été retournée dans l'eau glacée pendant 1 h. Le réactif I-12 (0,2 ml) a été ajouté et le mélange a été doucement agité avec le vortex. Les échantillons ont été stockés à une température de l'ordre de -4°C pendant 16 heures. Ensuite, les échantillons ont été transférés dans des tubes pour les centrifuger à 10000 g pendant 15 minutes à 0 ° C. Le surnageant est aspiré avec précaution avec micropipette. Comme la solubilité du complexe augmente nettement avec la température, il est important que les tubes soient maintenus jusqu'à ce que le complexe froid soit séparé du milieu acide. Le culot est dissous dans 9 ml de 1,2-dichloroéthane (réactif). Premier lavage avec 0,5 ml et laisser 5 minutes. Mélanger les tubes avec le vortex pour effectuer une solubilité complétedarste solvant. Après 2h, l'absorbance a été mesurée à 365 nm avec spectrophotomètre UV-visible (Gieve et Grattan 1983). Les standards de la glycine bétaine (50-200 pg/ml) ont été préparés dans de l'acide sulfurique 2 N et la procédure pour l'estimation l'échantillon a été suivie.

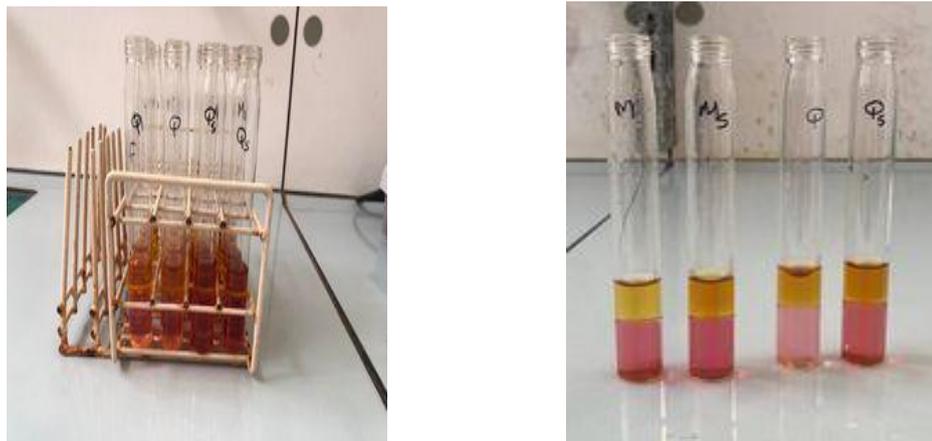


Figure 13 : dosage de la glycine bétaine.

3. L'analyse statistique :

Le test de Bartlett teste l'homogénéité des variances, une hypothèse d'ANOVA. Le test de Bartlett est connu pour être trop sensible aux données non normales.

Une probabilité résultante de $P \leq 0,001$ indique que les variances peuvent ne pas être homogène et vous souhaitez peut-être transformer les données avant de faire une ANOVA.

Pour les plans ANOVA sans répliques (notamment la plupart des blocs randomisés et plans en carré latin).



CHAPITRE III : Résultats et discussion

1. Le peroxyde d'hydrogène (H₂O₂):

Le peroxyde d'hydrogène peut provoquer la dégradation des protéines, la libération de Fe³⁺ ; l'oxydation de l'ADN, de lipides, mais également l'inactivation d'enzymes. Sa capacité à traverser les membranes biologiques fait du peroxyde d'hydrogène une des composantes utilisée par les cellules.

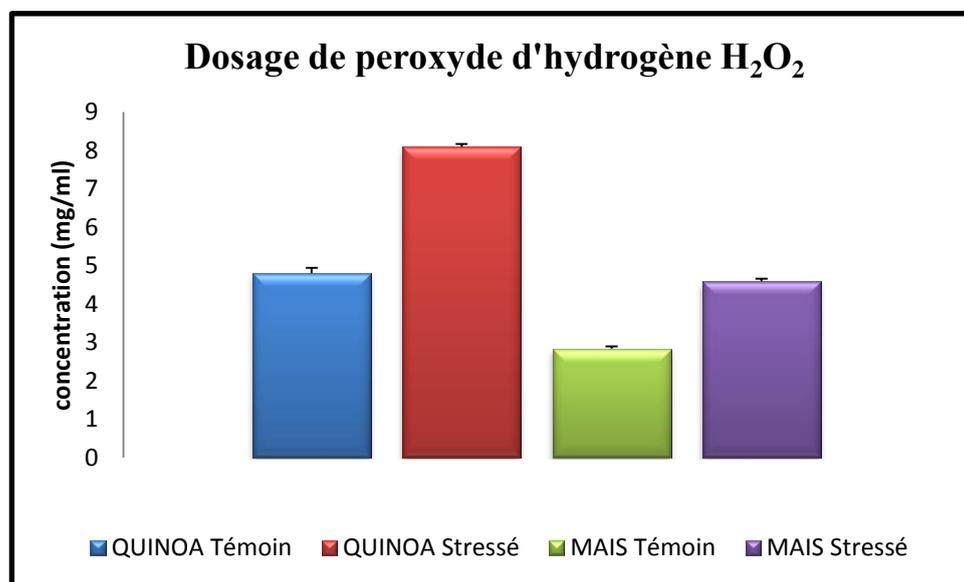


Figure 14: La concentration de peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) chez les deux espèces sous l'effet du stress hydrique.

La concentration du peroxyde d'hydrogène chez les deux espèces étudiées a augmenté. Elle est marquée chez l'espèce quinoa stressé avec une valeur maximale de 8.09±0.07 (mg/ml) par rapport au témoin 4.8±0.13 (mg/ml), par contre le maïs stressé a marqué une valeur minimale de 4.59±0.62 (mg/ml) par rapport au témoin 2.8±0.06 (mg/ml). Ce qui est compatible aux résultats de Bouchareb et *al* (2016) qu'ils ont observé une augmentation d'accumulation de peroxyde d'hydrogène chez le blé dur stressé 4.84 (mg/ml). Aussi Moussa et Abdel-Aziz, (2008) leurs résultats sont similaires, ils ont marqué une augmentation de concentration de H₂O₂ chez le maïs 5.09 (mg/ml) lors d'un stress hydrique.

L'analyse de la variance (Anova) a montré une signification chez les espèces stressés et les espèces témoins P < 0,001.

2. Le malonedialdéhyde (MDA):

Lors d'un stress oxydatif le MDA est formé à partir d'une auto oxydation et d'une dégradation des acides gras polyinsaturé dans les cellules, Afin d'estimer la peroxydation des lipides dans les membranes et le système biologique on procède par le dosage du MDA par spectrophotomètre.

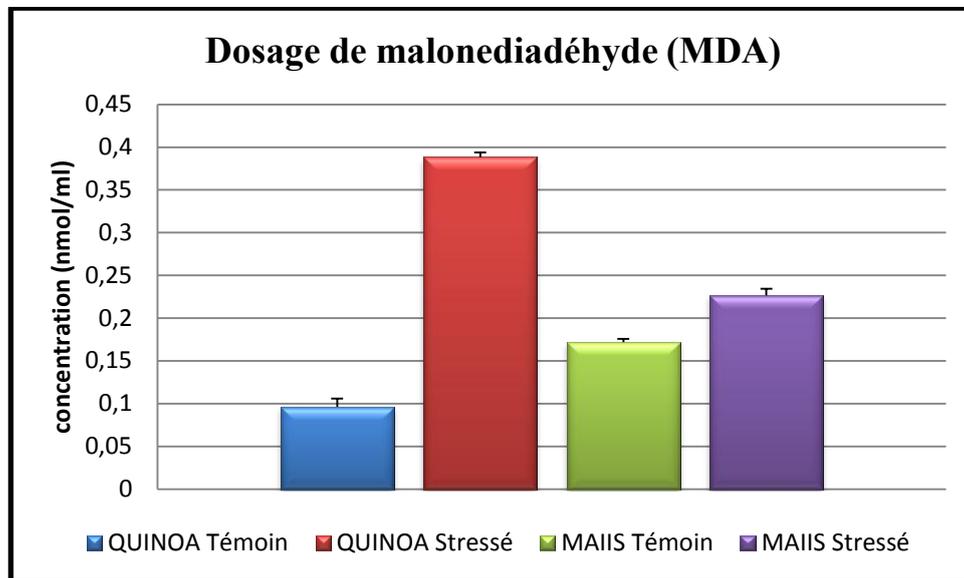


Figure 15 : La concentration de malonedialdéhyde (MDA) chez les deux espèces sous l'effet du stress hydrique.

Dans cette étude le stress a augmenté la concentration de la malonedialdéhyde (MDA) chez les deux espèces étudiées. Cette augmentation est observée chez le quinoa stressé avec une valeur maximale de $0,38 \pm 0,05$ (nmol/ml) par apport au témoin $0,09 \pm 0,009$ (nmol/ml), par contre le maïs stressé a marqué une valeur minimale de $0,22 \pm 0,007$ (nmol/ml) par apport au témoin $0,17 \pm 0,003$ (nmol/ml).

Ce qui est compatible aux résultats d'Aziz et *al* (2017) qu'ils ont observé une augmentation de la teneur en malonedialdéhyde dans la plante de quinoa d'une valeur de 0.27 (nmol/ml), ainsi les résultats de Beghar Zahedi et *al* (2016) chez l'orge qui a observé aussi une augmentation chez l'orge stressé d'une valeur 0.3 (nmol/ml).

L'analyse de la variance (Anova) a montré une signification chez les espèces stressés et les espèces témoins $P < 0,001$.

3. Les protéines totales :

L'oxydation des protéines peut être un signal pour les "protéines de stress" (Heat Shock Protein, HSP) connus pour leur rôle cyto protecteur (Welch, 1992). Ainsi, les membres de la famille de HSP70 ont un rôle de protéines chaperonnes.

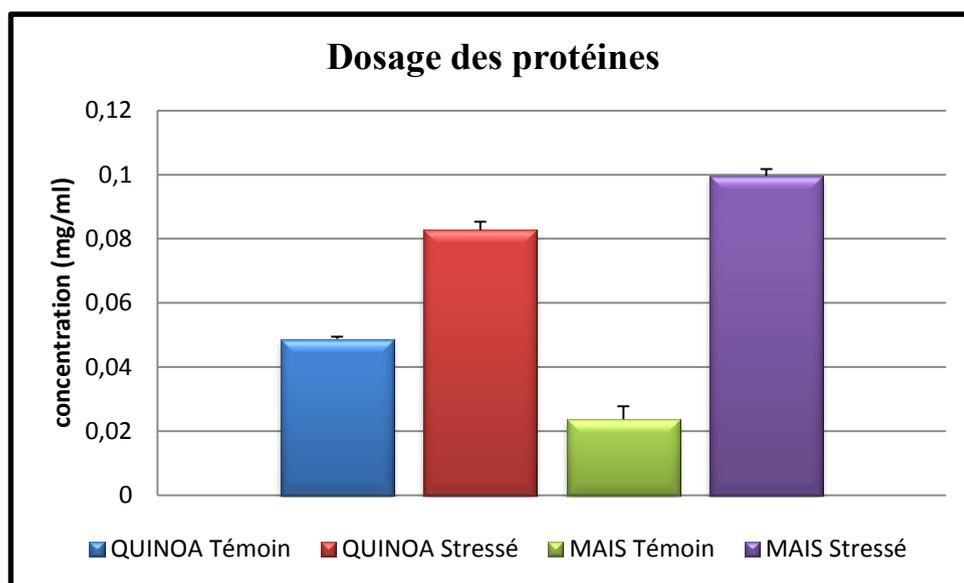


Figure 16 : La concentration des protéines totales chez les deux espèces sous l'effet du stress hydrique.

Dans cette étude le stress a augmenté la concentration des protéines chez les deux espèces étudiées. Cette augmentation est marquée chez le maïs stressé avec une valeur maximale de $0,09 \pm 0,002$ (mg/ml) par rapport au témoin $0,02 \pm 0,004$ (mg/ml), par contre le quinoa stressé a marqué une valeur minimale de $0,08 \pm 0,002$ (mg/ml) par rapport au témoin $0,04 \pm 0,007$ (mg/ml). Ce qui est semblable à ce qui a été signalé par Mouffak, les protéines totales chez l'espèce haricot mungo ont augmenté lorsqu'elles sont soumises à des conditions de stress hydrique avec une valeur $0,026$ (mg/ml). Ainsi que chez l'orge, Beghar Zahedi et al (2016) a observé une augmentation de concentration des protéines d'une valeur $1,32$ (mg/ml).

L'analyse de la variance (Anova) a montré une signification chez les espèces stressés et les espèces témoins $P < 0,001$.

4. Les polyphénols totaux :

Les composants phénoliques permettant de résister aux diverses agressions vis-à-vis des organes pathogènes. Ils participent de manière très efficaces à la tolérance des végétaux a des stress environnementaux.

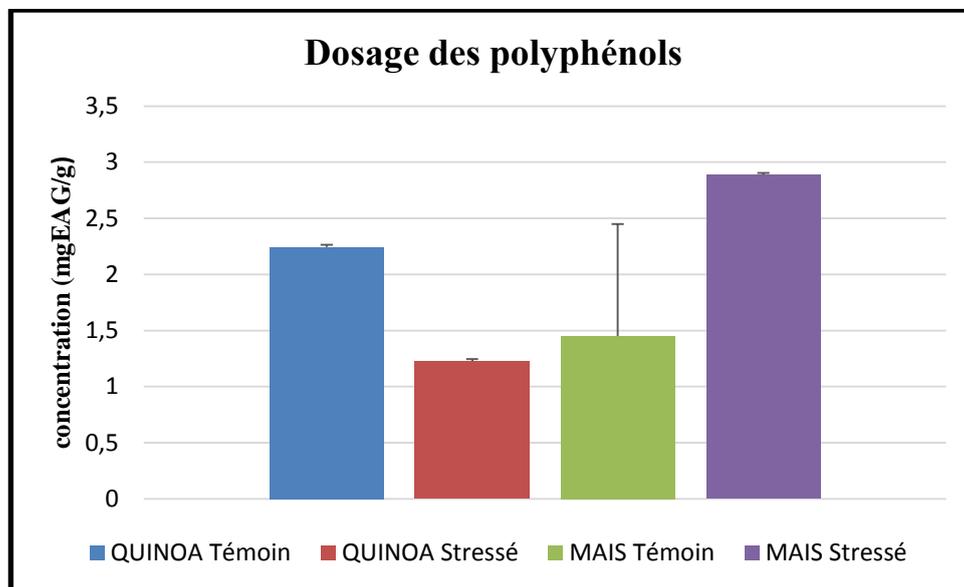


Figure 17 : La concentration des polyphénols totaux chez les deux espèces sous l'effet du stress hydrique

La concentration des polyphénols varie d'une espèce a une autre; En effet : Elle a augmenté chez le maïs après le stress appliqué d'une valeur maximale 2.88 ± 0.015 (mgEAG/g) par rapport au témoin 1.45 ± 0.014 (mg/ml), par contre chez le quinoa la concentration a diminué 1.22 ± 0.019 (mgEAG/g) par rapport au témoin avec une valeur 2.24 ± 0.02 (mgEAG/g).

Ceci est n'est pas en accord avec ce qui a été rapporté précédemment obtenues par Boussora et *al.*, (2018) chez l'orge, dans l'orge stressé ils ont obtenues la valeur $(8.8 \pm 0.226$ mg EAG/g), tandis que le témoin d'une valeur $(7.99 \pm 0.5$ mg EAG/g).

L'analyse de la variance (Anova) est significative chez les deux espèces stressées et témoins $P < 0,001$.

5. Les flavonoïdes :

La quantité de composés phénoliques tels que les flavonoïdes dépend essentiellement du stade de croissance de la plante, les conditions climatiques et environnementales, la localisation géographique et les différentes maladies qui peuvent affecter la plante.

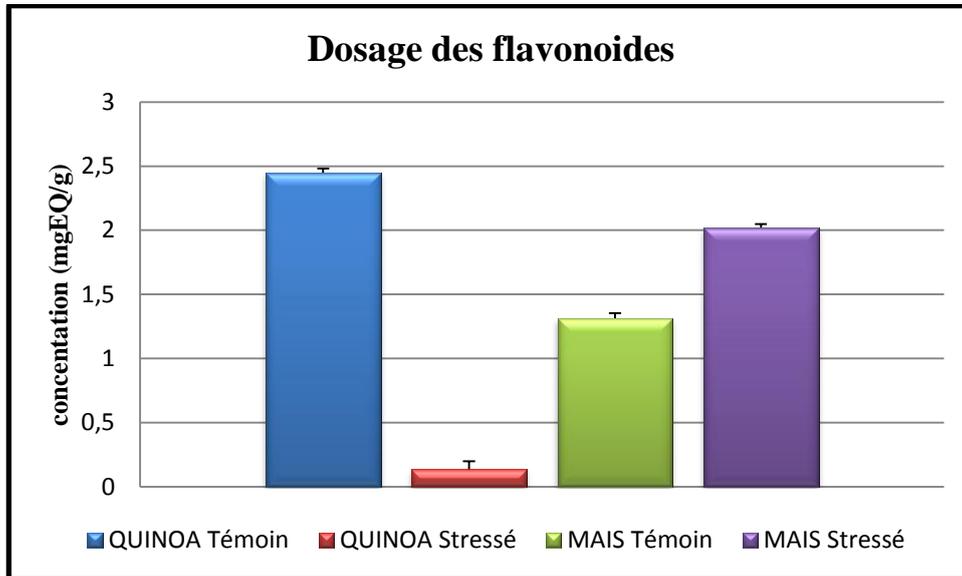


Figure 18 : La concentration des flavonoïdes totaux chez les deux espèces sous l'effet du stress hydrique.

Ces composés ont tendance à être plus concentrés dans les feuilles des plantes. Dans notre étude la concentration des flavonoïdes varie d'une espèce à une autre; En effet : la valeur maximale a été enregistrée chez l'espèce maïs après le stress appliqué 2.02 ± 0.002 (mgEQ/g) par rapport au témoin 1.31 ± 0.03 (mgEQ/g), par contre chez l'espèce quinoa la concentration a diminué 0.13 ± 0.06 (mgEQ/g) par rapport au témoin 2.44 ± 0.03 (mgEQ/g). Ceci n'est pas en accord avec ce qui a été obtenu par Boussora et *al.*, (2018) chez l'orge, dans l'orge stressé ils ont obtenu la valeur (3.8 ± 0.99 mg EQ/g), tandis que l'orge témoin d'une valeur (3.03 ± 0.87 mg EQ/g).

Les résultats contrastés peuvent être dus à un effet spécifique à l'espèce ou peuvent être liés à la sévérité du stress hydrique dans les cellules ou les tissus végétaux (Aziz et *al.*, 2017).

L'analyse de la variance (Anova) a montré une signification chez les espèces stressées et les espèces témoins $P < 0,001$.

6. La glycine bétaine :

La glycine bétaine est d'importants osmolyte qui s'accumule chez les plantes soumises à différents stress abiotiques dont notamment la sécheresse (Khedr et *al.*, 2003 ; Anjum et *al.*, 2011). La glycine bétaine améliore le système de défense antioxydant pour contrer et défendre le stress oxydatif induit par le stress hydrique et peut stabiliser les organites cellulaires (Demiral et Turkan, 2004).

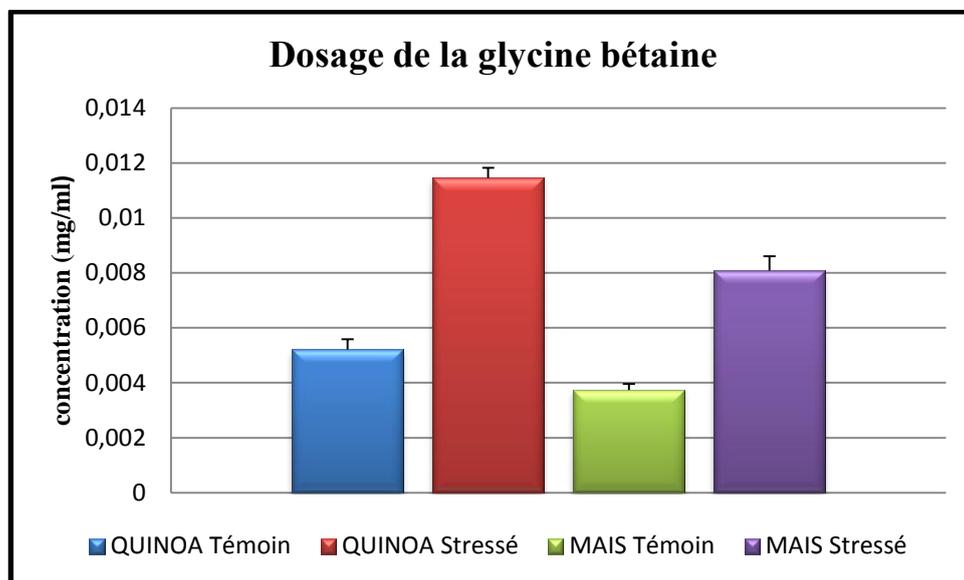


Figure 19: La concentration de la glycine bétaine chez les deux espèces sous l'effet du stress hydrique.

La concentration de la glycine bétaine augmente progressivement avec le stress hydrique chez les deux espèces étudiées. Cette augmentation est bien marquée chez l'espèce quinoa stressé avec une valeur maximale de $0,01 \pm 0,00037$ (mg/ml) par rapport au témoin $0,005 \pm 0,0003$ (mg/ml), la valeur minimale a été marquée chez l'espèce maïs avec une valeur de $0,008 \pm 0,0005$ (mg/ml) par rapport au témoin $0,003 \pm 0,0002$ (mg/ml). Ceci est en accord avec ce qui a été rapporté précédemment chez l'espèce *Amaranthus.C* (Beghin C., 2019) et chez le Quinoa (Aziz et *al.*, 2017) avec une valeur 0.46 (mg/ml).

L'analyse de la variance (Anova) a montré une signification chez les espèces stressés et les espèces témoins $P < 0,001$.

Discussion générale

L'évaluation de la réponse au stress hydrique chez les deux espèces : le maïs (*Zea mays L*) et le quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) révèle l'existence d'une grande variabilité pour la plupart des paramètres mesurés.

La concentration de la peroxyde d'hydrogène des deux espèces stressées est peu élevée que celle des témoins mais spécifiquement noter chez la plante de quinoa stressée d'une valeur 8.09 (mg/ml). Le H₂O₂ joue le rôle d'une molécule signal qui alerte la cellule de la présence d'un stress environnemental (Rentel et Knight, 2004; Maksymiec, 2007). Selon Dat et al. (2000), H₂O₂ peut fonctionner comme un messager secondaire à des faibles concentrations mais il devient toxique à fortes concentrations. Le H₂O₂ peut provenir de la réaction de dismutation de l'anion superoxyde par la SOD (Cakmak, 2000; Mishra et al., 2006).

La concentration de malonaldehyde MDA chez les deux espèces a augmenté sous l'effet du stress hydrique, elle est bien marquée chez le quinoa aussi d'une valeur 0.38 (nmol/ml). Donc les MDA joue un rôle d'indicateur de stress abiotique par conséquent il peut être utilisé comme bio marqueur du stress oxydatif (Ladhar- Chaabouni et al. 2007 ; Funes et al. 2005 ; Giguère et al. 2003). Comparativement à la littérature les stress environnementales provoquent une accumulation de MDA qui permet de montrer une accumulation de MDA soit racinaire pour certains auteurs (Dixit et al, 2001; Mishra et al. 2006) soit foliaire (Yannarelli et al. 2006; Liu et al., 2007).

Les résultats des protéines totales montrent des concentrations élevées chez le quinoa et le maïs stressés par rapport aux plantes témoins d'une valeur maximale 0.08 (mg/ml) chez le quinoa. Les protéines modifiées par oxydation perdent leurs propriétés biologiques et deviennent beaucoup plus sensibles à l'action des protéases et notamment du protéasome (Friguet, 2003 ; Garait, 2006).

Les polyphénols totaux montrent des résultats différents entre les deux espèces, chez le maïs on a noté une grande augmentation de concentration des polyphénols d'une valeur 2.88(mgEAG/g), contrairement chez le quinoa, on a marqué une diminution d'une valeur 1.22(mgEAG/g). Ainsi que les résultats des flavonoïdes on a noté une augmentation chez le maïs stressé d'une valeur 2.02(mgEQ/g), et une diminution chez le quinoa stressé d'une valeur faible 0.13(mgEQ/g).

Afin d'échapper aux périodes de sécheresse, le quinoa recourt à un allongement du cycle pendant les premiers stades de croissance alors qu'il suit d'autres stratégies pour tolérer le stress, principalement grâce à l'élasticité de ses tissus, à son potentiel osmotique faible et la formation de glandes vésiculaires spéciales et de petites cellules ayant une paroi épaisse. Cette plante se caractérise par un système racinaire très étalé en surface et qui peut être profond dans le sol. La souplesse phénologique élevée du quinoa se comporte comme un mécanisme d'échappement à la sécheresse puisque un stress

Chapitre III : Résultats et discussions

hydrique sévère pendant le stade de floraison peut entraîner une augmentation considérable du temps de la maturité physiologique (Rjeibi W. et *al.*, 2015)

La concentration de la glycine betaine a augmenté chez les deux espèces d'une valeur maximale le maïs stressé 0,008(mg/ml), et d'une valeur minimale 0,01(mg/ml) chez le quinoa.

La glycine augmente la pression osmotique dans la cellule végétale afin d'éviter la fuite de l'eau hors de la cellule aboutissant à sa mort. Elle permet la rétention ou la diffusion de l'eau et des oligo-éléments par la gestion de cette pression osmotique. L'accumulation de la bétaine est considérée comme une des réponses induites les plus répandues en cas de stress hydrique.



CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

Certaines études ont permis de décrire les comportements variés vis-à-vis des contraintes abiotiques qui règnent dans l'environnement de la céréaliculture Algérienne.

La sécheresse représente l'un des principaux facteurs de la réduction des rendements agricoles. L'un des défis de la recherche actuelle en écophysiologie végétale est de produire des variétés de plantes à intérêt agronomique présentant une tolérance vis-à-vis du stress hydrique.

Globalement, cette étude a montré que les deux espèces étudiées : le maïs (*Zea mays L*) et le quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) sont des plantes tolérantes aux contraintes abiotiques qui limitent la productivité céréalière. Pour déterminer la sensibilité de ces plantes au stress hydrique et ses réactions oxydatives, on a choisi des travaux sur la plante de quinoa et le maïs cultivées en Algérie, et voir l'effet du stress hydrique sur les différents mécanismes de tolérance et d'adaptation biochimiques que déclenchent ce stress.

Le stress hydrique qui a été impliqué sur le maïs (*Zea mays L*) a augmenté le taux de tous les paramètres mesurés (peroxyde d'hydrogène H_2O_2 , le malonaldehyde MDA, les protéines totales, les flavonoïdes et les polyphénols totaux), par contre chez le quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) on a noté une augmentation de concentration de peroxyde d'hydrogène H_2O_2 , le malonaldehyde MDA et les protéines totales, contrairement aux concentrations des flavonoïdes et polyphénols totaux qui montrent une diminution.

Enfin, d'après les résultats de notre étude nous concluons que l'espèce *Chenopodium quinoa Willd* est plus tolérante que l'espèce *Zea mays L* contre les contraintes hydriques.

**RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

Références bibliographique:

A

- Abdellaoui R, Bouralleb F, Haddad Z., 2016. Etude de quelques critères adaptatifs de *Stipa lagascae* vis-à-vis du déficit hydrique. *Journal of New Sciences Agriculture and Biotechnology*, IABC(21), 1350-1359.
- Aboussouan-Seropain C, Planchon C. (1985). Réponse de la photosynthèse de deux variétés de blé à un déficit hydrique foliaire. *Agronomie*, 5(7), p. 639-644.
- Adolf V., Jacobsen S.E., Sahbala S., 2013. Salt tolerance mechanisms in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Environ. Exp. Bot.*, 43-54.
- Anjum, S.A., Xie, X.Y., Wang, L.C., Saleem, M.F., Man, C., Lei, W., 2011. Morphologique, réponses physiologiques et biochimiques des plantes au stress hydrique. *Afr. J. Agric. Rés.* 6, 2026-2032.
- Aslam, M., Khan, I. A., Saleem, M. and Ali, Z.; 2006. Assessment of water stress tolerance in different maize accessions at germination and early growth stage. *Pak. J. Bot.*, 38(5): 1571 -1579.
- Aziz, Aniq, Akram, Nudrat Aisha, Ashraf, Muhammad (2017). Influence of natural and synthetic vitamin C (ascorbic acid) on primary and secondary metabolites and associated metabolism in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) plants under water deficit regimes. *Plant Physiology and Biochemistry*.

B

- Bagchi, D., Kuszynski, C., Balmoori, J., Bagchi, M., Stohs, S. J. (1998). Hydrogen peroxide-Chloroplasts and Their functions. *Plant Physiology* 141(2), 391-396.
- Beghin C, (2019). Etude de l'effet de la salinité du sol sur la valeur nutritionnelle des feuilles d'*Amaranthus cruentus*. Faculté des ingénieurs. Université catholique de Louvain.
- Belbachir KH, (2019). Etude phytochimique et l'activité antioxydante de la plante «*Eucalyptus camaldulensis*». De Master. Université Belhadj Bouchaïd'ain- Temouchent. 77.
- Ben Naceur M, Nailly M et Selmi M. 1999. Effet d'un déficit hydrique, survenant à différents stades de développement du blé, sur l'humidité du sol, la physiologie de la plante et sur les composantes du rendement. *MEDIT*, 2, p. 53-60.
- Benkaddour M. 2014. Modification physiologique chez des plantes de blé (*Triticum durum* Desf) exposées à un stress salin. Université Badji Mokhtar, Annaba. Thèse de doctorat: 23- 80-81p.

Références bibliographiques

- Bérubé R, Malenfant J, Gauvin D, Biais M, Gagnon E, Dumas R, Racine M.C, ourque J, Bélanger A, (2000). Quantitation of androgenic and estrogenic steroids in rat and monkey serum using gas chromatography and negative chemical ionisation mass spectrometry. Proc 48th ASMS Conference on Mass spec-trometry and Allied Topics, Long Beach, CA. 605.
- Benes E., Cerespo F.et Madrigal K.2001.the quinoa cluster. Competitive diagnosis and strategic recommendations.Pp54.
- Bennefont-Rousselot D., Therond P.et.Delattre J. (2003) Radicaux libres et antioxydants. Ed : Flammarion Médecine-Sciences ,59-81.
- Bessas, A; Benmoussa, L; Kerarma, M. Dosage biochimique des composés phénoliques dans les dattes et le miel récoltés dans le sud Algérien. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en biologie. 2007.
- Bhattacharya, S (2008). Reactive Oxygen Species and Cellular Defense System. In Free Radicals in Human Health and In Biotechnology 9(2), 214-219.
- Bouchareb R,Benkolli M,Bouzeghala B.(2016) Etude biochimique de dix variétés de blé dur (Triticum durum Desf.) sous l'effet d'un stress oxydatif généré par un stress hydrique. Université des frères Mentouri Constantine.
- Boussora F.,Tebra T.,Guasmi,F., BEN ALI S.,(2018). Etude de la composition phénolique et des propriétés antioxydantes d'extraits des feuilles de cinq variétés d'orge (Hordeum vulgare L.) soumis à un stress hydrique (PEG 6000). Revue des Régions Arides n°43 (3/2017) – Numéro spécial – Actes du 5ème Meeting International sur l'Aridoculture et les Cultures Oasiennes.
- Bradford, Mm (1976). Une méthode rapide et sensible pour la quantification de quantités de protéines en microgrammes utilisant le principe de la liaison protéine colorant Biochimie analytique, 72 (1-2), 248-254

C

- Cercam., 2014- Fiche de synthèse QUINOA Une culture à fort potentiel d'adaptation et de production pour le Maroc. Maroc, p: 3.
- Chahbar, S., Belkhodja, M. (2016). Water deficit effects on morpho-physiologicals parameters in durum wheat. Journal of Fundamental and Applied Sciences, 8(3): 1166-1181.
- Chaumeil, P. (2006) Plasticité moléculaire de deux écotypes de pin maritime soumis àun stress osmotique. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, 382 p.
- Chaves M.M., Pereira J.S., Marco J., Rodrigues M.L., Ricardo c.P.P. Osorio M.L., Carvalho I., Faria T. & Pinheiro C ., 2002. How plants cope with water stress in the field. Photosynthesis and growth.

Références bibliographiques

Annals of Botany 89: 907-916.

- Cirad-Gret 2002: Mémento de l'agronome. 5 ème ed, 1691p.
- Cochard H, Venisse JS, Barigah TS, Brunel N, Herbette S, Guilliot A, Tyree MT, Sakr S (2007) Putative role of aquaporins in variable hydraulic conductance of leaves in response to light. *Plant Physiol* 143: 122-133.
- Cotellet, N. (2001). Role of flavonoids in oxidative stress. *Curr Top Med Chem.* 1: 569–590.

D

- Da Cunha Veloso A., 2016- Impacts de l'essor international du quinoa. Haute École de Gestion de Genève (HEG-GE). Suisse, p 2-3.
- De Carlo, G., Autore, G., Izzo, A. A., Maiolino, P., Mascolo, N., Viola, P., Diurno, M. V., Capasso.,1993. Inhibition of intestinal motility and secretion by flavonoids in mice and rats: structure-activity relationships.
- Demidchik V, (2014). Mechanisms of oxidative stress in plants: From classical chemistry to cell biology. *Environmental and Experimental Botany* 109: 212–228.
- Demiral, T., Turkan, I., 2004. La glycine bêtaïne exogène affecte-t-elle le système antioxydant du riz semis sous traitement au NaCl. *J. Plant Physiol.* 161, 1089-1100.
- Doorenbos, J., Kassam, A.H., Bentverisen, C. L. M., Bransheid, V., Plusjé.J.M.G.A. Smith, M., Uittenbogaard, G.O., Van Der Val, H.K. (1980) Réponse des rendements à l'eau. Print book, French: PP 1.

E

- Edreva A (2005) Generation and scavenging of reactive oxygen species I chloroplasts: a submolecular approach. *Agriculture Ecosystems & Environment* 106: 119-133.

F

- F. (1993). Inhibition of intestinal motility and secretion by flavonoids in mice and rats : structure-activity relationships. *J Pharm Pharmacol.* 45(12): 1054–1059.
- Favier A, (2003). Le stress oxydant: Intérêt conceptuel et expérimental dans Intérêt conceptuel et expérimental dans la compréhension des mécanismes des maladies et potentiel thérapeutique.
- Favier M. et Hininger-Favier I, (2005). Zinc et grossesse. *Gynécologie Obstétrique et Fertilité* .Vol. 33(4):253-258.
- Faye, K., Heng, L.H., Collomp, R., Peroux, E. (2003) Hypertension et stress, *Journal des Maladies*

Références bibliographiques

Vasculaires, 28 (1) : 4-8.

- Forkmann, G. (1993). Biosynthesis and biodegradation of polyphenols. In: “polyphenolic phenomena”. Ed. Scalbert A. INRA (Paris). Chap 2: 65–71.
- Formica, J. V., Regelson, W. (1995). Review of the biology of quercetin and related bioflavonoids. *Food Chem Toxicol.* 33(12): 1061–1080.
- Foucault A., 2014- Effets d'un extrait de quinoa enrichi en 20-hydroxyecdysone dans un modèle d'obésité nutritionnelle : application clinique. Thèse doctorat. Agro Paris Tech. France, p: 112.
- Foyer C.H. et Noctor G., 2003. Redox sensing and signalling associated with reactive oxygen in chloroplasts, peroxisomes and mitochondria." *Physiologia Plantarum* 119, 355-364.
- Funes V Alhamâ J, Navas JI, I-npez-Barea J, Peinado J. (2006) Ecoroxicologicâl etrects of métal pollution in two mollusk species Iiom the Spanish South Adantic littoral *Environmentâl Pollution* 139:214 23.

G

- Gabbay-Azaria R., Tel-Or E., Schönfeld M. 1998. Glycine betaine as an osmoregulant and compatible solute in the marine cyanobacterium *Spirulina subsalsa*. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 264: 333-339.
- Gallais, 1984. *Physiologie du maïs*. Paris, France, INRA, 574 p.
- Gay J.P., 1984. *Fabuleux maïs*. Pau, France, AGPM, 295 p.
- Ghedira K. Les flavonoïdes: structure, propriétés biologiques, rôle prophylactique et emplois en thérapeutique. *Phytothérapie*, 2005, Vol 3(4) ; pp 162-169.
- Gill, S. S. and Tuteja, N. 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry* 48(12): 909-930.
- Gimeno J., Gadea J., Forment J., Pérez-Valle J., Santiago J., Martínez-Godoy M., Yenush L., Bellés J., Brumós J., Colmenero-Flores J., Talón M. and Serrano R. 2009. Shared and novel molecular responses of mandarin to drought. *Plant Mol. Biol.*, 70: 403-420.
- Grieve C.M., Grattan, S.R.,(1983). Rapid assay for the determination of water soluble quaternary ammonium compounds. *Plant Soil* 70, 303-307.
- Guei R.G., Wassom C.E. 1993. Genetics of osmotic adjustment in breeding maize for drought tolerance.

H

- Hafsi M., Monneveux, P., Merah, O., Djekoune., A. (2001) Discrimination isotopique du carbone et

Références bibliographiques

rendement du blé dur dans les hautes plaines Sétifiennes, Algérie, 12(1) : 37-43.

- Haleng J , Pincemail J , Defraigne J.O , CHarlier C , cHaPelle J.P , (2007). Le stress oxydatif.Rev Med Liege; 62: 10: 628-638.
- Halliwell B et Whiteman M, (2004). "Measuring reactive species and oxidative damage in vivo and in cell culture.
- Halliwell, B. (2007). Dietary polyphenols: Good, bad, or indifferent for your health? Cardiovascular Research. 73: 341– 347.
- Halliwell, B., Aruoma, O.I. (1993). DNA damage by oxygen-derived species: its mechanism and measurement using chromatographic methods. In Molecular Biology of Free Radicals Scavenger System. (JG Scandalios, ed). Cold Spring Harbor Laboratory Press. New York. 47– 67.
- Harborne, J.B. (1994). Phenolics. In: Natural products: their chemistry and biological significance. Eds. Mann, J., Davidson, R. S., Hobbs, J.B., Harborne, J.B. Longman (London). Chap. 6: 361–388.
- Harborne, J.B., Williams, C. A. (2000). Advances in flavonoid research since 1992. *Phytochemistry*.
- Haslam, E. (1993). Polyphenol complexation. In: « Polyphenolic phenomena ». Ed. Scalbert A.
- Hemingway, R.W, 1992; Structural variation in proanthocyanidins and their derivatives. In: Lpant polyphenols: synthesis, proprieties, significande. Laks P.E, Hemingway R.W New York.
- Herbillon M., 2015- Le Quinoa: Intérêt nutritionnel et perspectives pharmaceutiques. Thèse doctorat en pharmacie. Université de rouen u.f.r de médecine et de pharmacie. France, p:27 50.
- Hernandez J.A ET Almansa M.S., (2002). Short-term effects of salt stress on antioxidant systems and leaf water relations of pea leaves, *Physiol Plant*, vol. 115, no 2: 251-257.
- Hopkins, W. (2003) *Physiologie végétale*, 2re édition, De Boeck Université, paris : PP 452.

I

- Iltis, H. H. et Doebley, J. F. (1980). Taxonomy of *Zea* (gramineae). Subspecific categories in the *Zea mays* complex and a generic synopsis *American Journal of Botany*, 67: 994- 1004.

J

- Jones H G. 1992. *Plant and Microclimates* (Ed): A quantitative approach to environmental plant physiology, Cambridge University Press London. In: (Kiani, 2007).
- Jacobsen S.E, Mujica A. and Jensen C.R.2003.the resistance of quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.) to adverse abiotic factors. *Food Reviews international* 19.Pp99-109.
- Jaleel, C.A.A; GOPI, R. and PanneerselVAM, R. ; 2008. Growth and photosynthetic pigments responses of two varieties of *Catharanthus roseus* to triadimefon treatment. *Comp. Rend. Biol.*, 331:

K

- Kalam S., Gul M.Z., Singh R., Ankati S. (2015). Free radicals: Implications in etiology of chronic diseases and their amelioration through nutraceuticals. *Pharmacologia*. 6(1), 11-20
- Karabín M., Tereza Hudcová., Lukáš Jelínek., Pavel Dostálek., 2015. Biotransformations and biological activities of hop flavonoids. Department of Biotechnology, Faculty of Food and Biochemical Technology, University of Chemistry and Technology, Prague, Technická 5, 166 28 Prague 6, Czech Republic.
- Kehrer J.P., Klotz L.O., Roberts S.M. (2015). An overview of free radicals as causes and consequences of toxicity. In *Studies on Experimental Toxicology and Pharmacology*. Humana Press, Cham. pp. 21-27.
- Kim D.O., Jeong S.W. et Lee C. Y., 2003. Antioxidant capacity of phenolic phytochemicals from various cultivars of plums. *Food Chemistry*, 81, 321–326.
- Kueny-Stotz, Marie., 2008 .Contribution à la chimie des flavonoïdes : élaboration de Squelettes flavylium sophistiqués, nouvelle voie d'accès aux flavan3-ols et aux pro anthocyanidines.
- Kocsy G, Laurie R, Szalai G, Szilagyi V, Simon-Sarkadi L, Galiba G, Ronde J.A, (2005). Genetic manipulation of proline levels affects antioxidants in soybean subjected to simultaneous drought and heat stresses. *Physiol. Plant*. 124(2): 227-235.
- Khedr, AHA, Abbas, MA, Wahid, AAA, Quick, WP, Abogadallah, GM, 2003. Proline induit l'expression de protéines sensibles au stress salin et peut améliorer l'adaptation de *Pancratium maritimum* L. au stress salin. *J. Exp. Bot*. 54, 2553-2562.

L

- Ladhar-Chaabouni R, Gargoun R, Hamza-Chaffai A (2007) Effect of cadmium on some biomarkers in the clam *Ruditapes decussata*: metallothionein quantification by using two techniques. *Int J Environ Pollut* 10:593-601.
- Larabi M, (2017). Evaluation du stress oxydant au niveau d'une population de femmes atteintes de cancer de l'ovaire.
- Lebonvallet S., 2008- Implantation du quinoa et simulation de sa culture sur l'altiplano bolivien. Thèse doctorat. Agro Paris Tech. France, p:17-29.
- Lehucher-Michel MP, Lesgards JF, Delubac O, Stocker P, Durand P, Prost M. (2001) Stress oxydant et pathologies humaines. *La Presse méd*. 30, 1076-1081.

Références bibliographiques

- Leopoldini M, Russo N, Toscano M, (2011). The molecular basis of working mechanism of natural polyphenolic antioxidants.
- Loreto F ET Velikova V, (2001). Isoprene produced by leaves protects the photosynthetic apparatus against ozone damage, quenches ozone products, and reduces lipid peroxidation of cellular membranes. *Plant Physiology* 127:1781-1787.
- Loreto F et Velikova V, 2001. Isoprene produced by leaves protects the photosynthetic apparatus against ozone damage, quenches ozone products, and reduces lipid peroxidation of cellular membranes. *Plant Physiology* 127:1781-1787.
- Lushchak V.I. (2014). Free radicals, reactive oxygen species, oxidative stress and its classification. *Chemico-biological interactions*. 224, 164-175.

M

- Madhava Rao K.V.,Raghavendra A.S et Janardhan Reddy K.(2006) Printed in the Netherland *Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants*.Springer: 1-4p.
- Mandel, S., Amit, T., Reznichenko, L., Weinreb, O., Youdim, M.B. (2006). Green tea catechins as brain-permeable, natural iron chelators–antioxidants for the treatment of neurodegenerative disorders. *Mol Nutr Food Res*. 50: 229–34.
- Maradini A., Pirozi M., Borges J., Sant'Ana H., Chaves J., Coimbra J., 2015- Quinoa: Nutritional, functional and antinutritional aspects. Campus University. Brazil, p: 6-34.
- Mefti, M., Abdelguerfi, A., Chebouti, A. (2001) Etude de la tolérance à la sécheresse chez quelques populations de *Medicago truncatula* (L.) Gaertn. In: Delgado, I. (ed.),Lloveras, J. (ed.). *Quality in Lucerne and medics for animal production*. Zaragoza, CIHEAM: 173-176.
- Middleton, E., Kandaswami, C., Theoharides, T.C. (2000). The effect of flavonoids on mammalian cells: Implications for inflammation, heart disease, and cancer. *Pharmacol Rev*; 52 (4): 651– 674.
- Mittler R, (2004). "Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance." *Trends in Plant Science* 7(9): 405-410.
- Mittler R, Merquiol E, Hallak-Herr E, Rachmilevitch S, Kaplan A , Cohen M, (2001). "Living under a 'dormant' canopy: a molecular acclimation mechanism of the desert plant *Retama raetam*." *The Plant Journal* 25(4): 407-416.
- Miura, S., Watanabe, J., Tomita, T., Sano, M., Tomita, I. (1994). The inhibitory effect of tea polyphenols (Flavan-3-ol derivatives) on Cu²⁺ mediated oxidative modification of low density lipoprotein. *Biol Pharm Bull*. 17(12): 1567–1572.
- Mohammad Bagher Zahedi., Hooman Razi., Armin Saed-Moucheshi.,(2016) Evaluation of

Références bibliographiques

- Antioxydant Enzymes, Lipid Peroxidation and Proline Content as Selection Criteria for Grain Yield under Water Deficit Stress in Barley.71-78
- Morton, L. W., Amsha, A., Caccetta, R., Puddey, I. B., Croft, K. D. (2000). Chemistry and biological effects of dietary phenolic compounds: Relevance to cardiovascular disease. *Clin Exp Pharmacol Physiol.* 27: 152–159.
 - Mouellef, A. (2010) Caractères physiologiques et biochimiques de tolérance du blé dur (*Triticum durum* Desf.) au stress hydrique. Mémoire de magister, Université Mentouri, Constantine, 118 p.
 - Mouffak A .,Etude analytique de la variabilité de la proline, des sucres solubles totaux et des protéines totales solubles, sous stress salin chez *Vigna radiata*.L Wilezek. Mémoire de magister .Université d'oran Es Senia.
 - Mujica A., Izquierdo J., Marathe J.P. 2001.Origen y descripción de la quinua. In : Mujica A., Jacobsen S. E., Izquierdo J., Marathe J. P. y FAO, editors. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro. CIP, UNAP. FAO, CD Cultivos Andinos, version 1.0. Santiago, Chile.
 - Munns R, Tester M (2008) Mechanisms of salinity tolerance. *Annu Rev Plant Biol* 59: 651-681.
 - Murata N., Mohanty P. S., Hayashi H. and Papageorgiou G. C. 1992. Glycine betaine stabilizes the association of extrinsic proteins with the photosynthetic oxygen-evolving complex. *FEBS Letters*, 296: 187-189.
 - Moussa H.R, Abdel-aziz S.M.,(2008) Comparative response of drought tolerant and drought sensitive maize genotypes to water stress.

N

- Nakayama, T., Niimi, T., Osawa, T., Kawakishi, S. (1992). The protective role of polyphenols in cytotoxicity of hydrogen peroxide. *Mutat Res.* 281: 77–80.
- Narayana, K. R., Reddy, M. S., Chaluvadi, M. R., Krishina, D. R. (2001). Bioflavonoids classification, pharmacological, biochemical effects and therapeutic potential. *Ind J Pharmacol.* 33: 2–16.
- Nijveldt, R. J., van Nood, E., van Hoorn, D. E. C., Boelens, P. G., van Norren, K., van Leeuwen, and P.2001., Nutrition Flavonoids: a review of probable mechanisms of action and potential applications.

O

- Oukarroum, A. (2007) Vitalité des plantes d'orge ("*Hordeum vulgare*" L.) en conditions de stress hydrique et thermique analysée par la fluorescence chlorophyllienne.Thèse de doctorat, Université Genève, 196 p.

P

- Paolini V., Dorchies Ph., Hoste H. ; 2003. Effet des tanins condensés et des plantes à tanins sur les strongyloses gastro-intestinales chez le mouton et la chèvre. *Alter. Agri.*, 17-19.
- Pere Martinez S, Farina M, Ogando D, Ribeiro M.L, Gimeno M, Franchi A.M, (2000). Nitric oxide inhibits prostanoid synthesis in the rat oviduct.
- Poprac P., Jomova K., Simunkova M., Kollar V., Rhodes C.J., Valko M. (2017). Targeting free radicals in oxidative stress-related human diseases. *Trends in pharmacological sciences.* 38(7), 592-607
- Pourrut B, (2008). Implication du stress oxydatif dans la toxicité du plomb sur une plante modèle, *Vicia faba*. Thèse de Doctorat. L'université de Toulouse.

R

- Reichheld, J. P., Meyer, E., Khafif, M., Bonnard, G., Meyer, Y. (2005). AtNTRB is the major mitochondrial thioredoxin reductase in *Arabidopsis thaliana*. *FEBS Lett.* 579(2): 337–342.
- Rjjeib W, Kahlaoui b, Hachicha M., 2015, effet de l'irrigation avec des eaux salées sur une culture de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) en Tunisie: Réponses du quinoa aux contraintes hydriques et salées, Editions universitaires européennes, P26.46.48.98.
- Ribereau-Gayon P., 1968. Les composés phénoliques des végétaux. Dunod, Ed., Paris.p. 254.
- Roma-Mateo, C.; Aguado, C.; Garcia-Giménez, J.L.; Ibanez-Cabellos, J.S.; Seco-Cervera, M.; Pallardo, F.V.; Knecht, E.; Sanz, P. Increased oxidative stress and impaired antioxidant response in Lafora disease. *Mol. Neurobiol.* 2015, 51, 932–946. [CrossRef] [PubMed].
- Rouanet G., 1984: Le technicien d'agriculture tropicale: le maïs, 142p.

S

- Sakamoto A. and Murata N. 2002. The role of glycine betaine in the protection of plants from stress: clues from transgenic plants. *Plant Cell Environment*, 25: 163-171.
- Sakurai J., Ishikawa F., Yamaguchi T., Uemura M., and Maeshima M. 2005. Identification of 33 rice aquaporin genes and analysis of their expression and function. *Plant and Cell Physiology*, 46 (9): 1568-1577.
- Smirnov N., 1998. Plant resistance to environmental stress. *Current Opinion* in biotechnology.
- Sofo A, Dichio B, Xiloyannis E, Massia A, (2004). Effects of different radiance levels on some antioxidant enzymes and on malondialdehyde content during rewatering in olive tree.
- Sorg O. (2004). Oxidative stress: a theoretical model or a biological reality.

T

- Tardieu F. 2005. Plant tolerance to water deficit: physical limits and possibilities for progress. *Comptes-rendus Géoscience* 337: 57-67.
- Tester, M. and Bacic, A.; 2005. Abiotic stress tolerance in grasses. From model plants to crop plants. *Plant Physiol.*, 137: 791-793.
- Thymoquinone is a potent superoxide anion scavenger. *Drug and chemical toxicology*. 26: 87-98.
- Tim Cushnie, T. P., Lamb, J. A. (2005). Antimicrobial activity of flavonoids. *International Journal of Antimicrobial Agents*. 26: 343–356.
- Turner N. C., Wright G. C., Siddique K. H. M. (2001). Adaptation of grain legume to water limited environments. *Advanced Agronomy*, 71: 193-231.

V

- Valko M., Jomova K., Rhodes C.J., Kuča K., Musílek K. (2016). Redox-and nonredox-metal-induced formation of free radicals and their role in human disease. *Archives of toxicology*. 90(1), 1-37.

W

- Waridel, P. (2003). Investigation phytochimique des plantes aquatiques *Potamogeton pectinatus* L., *P. lucens* L., *P. perfoliatus* L. et *P. crispus* L. (*Potamogetonaceae*) ., Thèse de doctorat : Université de Lausanne : 2003.
- Weidinger A., Kozlov A.V. (2015). Biological activities of reactive oxygen and nitrogen species: oxidative stress versus signal transduction. *Biomolecules*. 5(2), 472-484.

Y

- Yang, K., Lamprecht, S. A., Liu, Y., Shinozaki, H., Fan, K., Leung, D., Newmark, H., Steele, V. E., Kelloff, G. J., Lipkin, M. (2000). Chemoprevention studies of the flavonoids quercetin and rutin in normal and azoxymethane-treated mouse colon. *Carcinogenesis*. 21(9): 1655–1660.
- Yao LH, jiang YM, Shi J, Tomas-barbaran, Datta N, et al,(2004). Flavonioids in food and their health benefits. *Plant foods Hum Nutr* 59: 113-122.

Z

- Zahid A, (2010). Mécanismes cellulaires et moléculaires régissant le métabolisme des semences de céréales : Rôle du système antioxydant dans la prédiction de la qualité germinative. Thèse de Doctorat. L'université de Toulouse.
- Zelko IN, Marian TJ, Folz RJ. (2002). Superoxide dismutase multigene family: a comparison of the CuZn-SOD (SOD1), Mn-SOD (SOD2), and EC-SOD (SOD3) gene structures, evolution, and

Références bibliographiques

- expression. *Free Rad Biol & Med.* 33, 337-349.
- Zerrad W, Maataoui B ,Hilali S, El Antri S, Laza S, Hmyene A.(2009).The effect of hydric stress upon the synthesis of four isoenzymes of two varieties of durum wheat. *Scientific study end Reseach*, vol3, p. 53-259.
 - Zini, A., Del, R. D., Stewart, A.J., Mandrioli, J., Merelli, E., Sola, P. (2006). Do flavan-3-ols from green tea reach the human brain? *Nutr Neurosci.* 9: 57– 61.



ANNEXES

Annexes

Annexe 1: concentration de malonaldehyde MDA

MDA	Mais		Quinoa	
	témoin	stressée	témoin	Stressée
C1	0,1762183	0,2191112	0,089241	0,3823424
C2	0,1690695	0,2346003	0,1071131	0,3932531
C3	0,1714524	0,22626	0,0928154	0,3894912
Total	0,1722467	0,2266571	0,0963898	0,3883622
Ecartype	0,00364	0,0077522	0,009457	0,0055422

Annexe 2: concentration de peroxyde d'hydrogène H₂O₂

h2o2	Mais		Quinoa	
	témoin	Stressée	témoin	Stressée
C1	2,775	4,6	4,95	8,025
C2	2,825	4,65	4,675	8,175
C3	2,9	4,525	4,775	8,075
Total	2,8333333	4,5916667	4,8	8,0916667
Ecartype	0,0629153	0,0629153	0,1391941	0,0763763

Annexe 3: concentration des protéines totales

Protéines	Mais		Quinoa	
	témoin	stressée	témoin	Stressée
C1	0,0277406	0,1001072	0,0491825	0,0853659
C2	0,0237202	0,097427	0,0478424	0,0800054
C3	0,0196998	0,1014473	0,0491825	0,0826856
Total	0,0237202	0,0996605	0,0487358	0,0826856
Ecartype	0,00402037	0,00204707	0,00077372	0,00268025

Annexe 4: concentration des flavonoïdes totaux

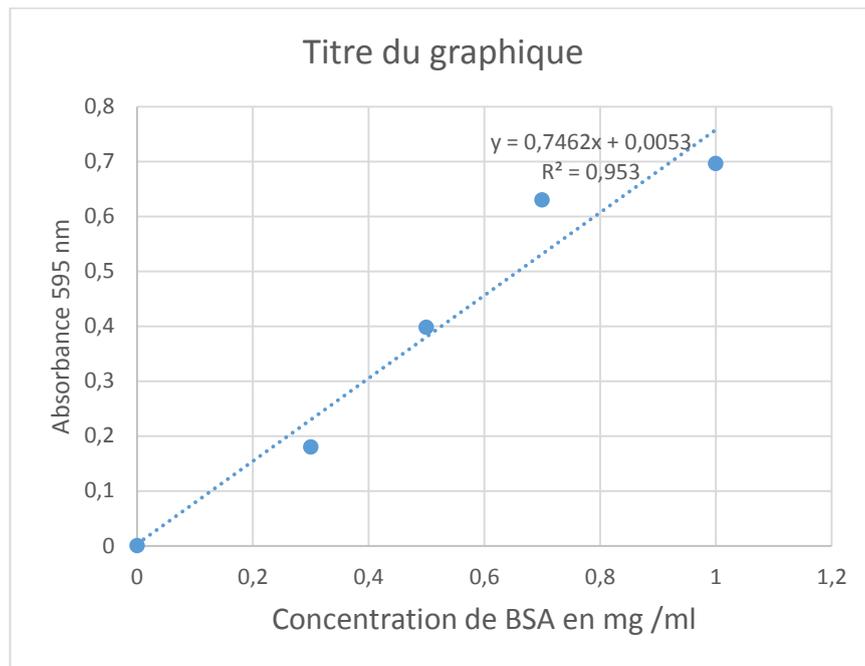
Flavonoïdes	Maïs		Quinoa	
	Témoin	Stressée	Témoin	Stressée
C1	1,35833333	1,99375	2,44166667	0,06666667
C2	1,28541667	2,025	2,42083333	0,15
C3	1,29583333	2,04583333	2,48333333	0,19166667
Totale	1,31319444	2,02152778	2,44861111	0,13611111
Ecartype	0,03943686	0,0262147	0,03182344	0,06364688

Annexe 5: concentration des polyphénols totaux

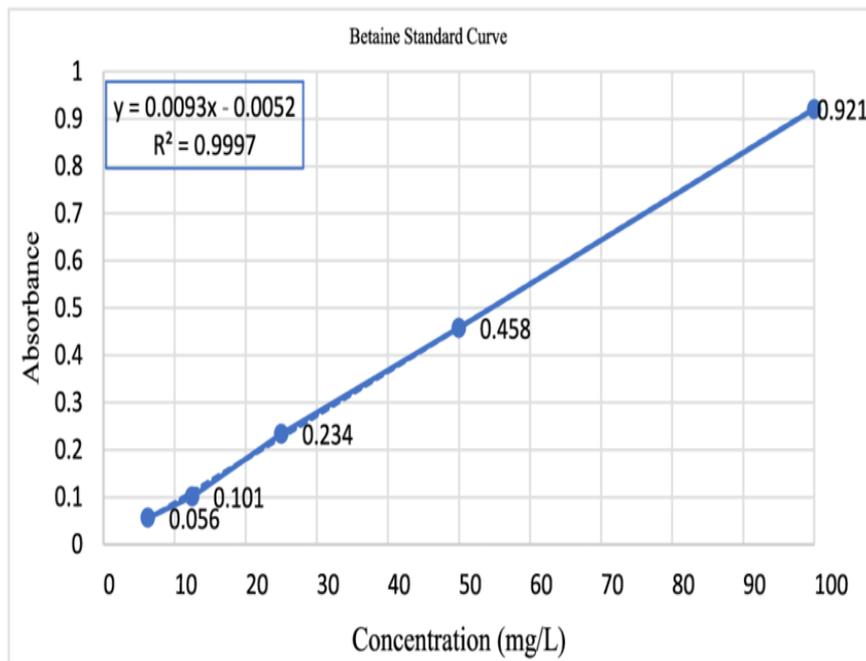
Polyphénols	Maïs		Quinoa	
	Témoin	Stressée	Témoin	Stressée
C1	1,44473684	2,88333333	2,2254386	1,21666667
C2	1,46666667	2,8745614	2,23859649	1,24736842
C3	1,44035088	2,90526316	2,26491228	1,2122807
Total	1,4505848	2,8877193	2,24298246	1,2254386
Ecartype	0,0140989	0,01581382	0,02009902	0,01911798

Annexe 6: concentration de glycine bétaine

Glycène	Maïs		Quinoa	
	témoin	Stréssée	témoin	Stressée
C1	0,0037419	0,0086882	0,0055699	0,0110538
C2	0,0035269	0,007828	0,0052473	0,0114839
C3	0,003957	0,0077204	0,0048172	0,0118065
Total	0,0037419	0,0080789	0,0052115	0,011448
Ecartype	0,00021505	0,00053042	0,00037762	0,00037762



Annexe 7: courbe d'étalonnage des protéines totales



Annexe 8: courbe d'étalonnage de glycine bétaine

Rows of data with missing values removed: 0				
Rows which remain: 24				
Source	df	Type II SS	MS	
F	P			

Main Effects				
Type de cu	3	1.010796e-4	3.3693e-5	231.83511 .0000 ***
Etat T S	1	1.536216e-4	1.5362e-4	1057.0348 .0000 ***
Interaction				
Type de cu * Etat T S	3	6.8691e-6	2.2897e-6	15.754898 .0000 ***
Error	16	2.325321e-6	1.4533e-7	<

Année universitaire : 2021-2022

**Présenté par : Meziane Bouchra
Boussouf Narjes Chiraz**

Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Biologie et physiologie végétale

Evaluation du comportement biochimique et antioxydant des deux espèces Quinoa et Maïs sur l'effet du stress oxydatif provoqué par un stress hydrique

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement biochimique et antioxydant des deux espèces Quinoa et Maïs. Les paramètres mesurés ont été réalisés au sein de la faculté des sciences et la nature Université Mentouri Constantine 1.

Les dosages sont : La glycine bétaine, le malonedialdéhyde (MDA), le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), les protéines, les polyphénols et les flavonoïdes.

Les résultats de cette étude indiquent qu'il y a une variabilité entre les plantes stressées et les plantes non stressées (témoins). La variabilité a été évaluée grâce à des analyses statistiques. Les résultats obtenus montrent que le stress hydrique a entraîné une production des espèces réactives de l'oxygène (ERO) ainsi que le rôle important des métabolites secondaires dans la défense contre le stress oxydatif causé par le stress hydrique. La concentration de la glycine bétaine, MDA, et le H_2O_2 a été plus élevée dans le Quinoa par les valeurs suivantes (0.01 mg/ml, 0,38 nmol/ml et 8,09mg/ml, respectivement), par contre les protéines totales la valeur maximale a été notée chez le Maïs (0.09 mg/ml). Chez les polyphénols et les flavonoïdes, on a enregistré des concentrations basses chez le Quinoa stressé (1.22mgEAG/g, 0.13mgEQ/g, respectivement) contrairement chez le Maïs (2.88mgEAG/g, 2.02mgEQ/g).

En conclusion, l'étude a montré que le Quinoa est plus tolérant et efficace que le Maïs contre les contraintes hydriques.

Mots-clefs : stress hydrique, stress oxydatif, antioxydants, Quinoa, Maïs.

Laboratoires de recherche : laboratoire n°13 de biologie et physiologie Végétale au niveau Université Frères Mentouri Constantine 1.

Encadreur : BOUCHAREB RADIA (MCA - UFM, Constantine 1).

Examineur 1 : BAZRI KAMEL EDDINE (MCA - UFM, Constantine 1).

Examineur 2 : ZAGHED NADIA (MCA - UFM, Constantine 1).