

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE SCIENCES

DEPARTEMENT D'AGRONOMIQUES

N° : 37/DSA/2021



DOMAINE : SNV

FILIERE : sciences agronomiques

OPTION : production végétale

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : Mlle. BOUKHALAT Marwa
M^r. CHELLALI Oussama

Intitulé

L'effet du stress salin sur le comportement de quelques
variétés du quinoa cultivée dans la région de M'sila.

Soutenu devant le jury composé de :

Mr. TELLACHE S.	Université de M'sila MAA	Président
Mr. HADJ KOUIDER B.	Université de M'sila MCA	Promoteur
Mme. LALLOUCHE B.	Université de M'sila MCA	Co-Promoteur
Mr. TORCHIT N.	Université de M'sila MAA	Examineur

Année universitaire : 2020 /2021

Remerciements

En préambule à ce mémoire nous remerciant ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Nous tenons à exprimer notre plus profonde gratitude et appréciation au promoteur de ce mémoire : **Mr. HADJKOUIDER B., MCA** et au co-promoteur **Mme LALLOUCHE B., MCA** au département d'agronomie, Université Mohamed Boudiaf de M'sila pour avoir acceptés de diriger ce travail, pour leur patience, encouragements, orientations et leurs conseils précieux.

Nous tenons à remercier chaleureusement les membres du jury : **Mr TELLACHE S., MAA** au département des Sciences Agronomiques, Université Med. Boudiaf de M'sila et **Mr TORCHIT N., MAA** au département des Sciences Agronomiques, Université Med. Boudiaf de M'sila de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire, de nous consacrer du temps et de porter leur jugement expert sur ce modeste travail.

Nous adressons aussi nos remerciements à l'ingénieur de la serre monsieur **Benyahia** pour son aide pratique et sa disponibilité durant notre préparation de ce travail

Nous remercions également l'équipe de laboratoire de département des sciences agronomiques, Université de Med. Boudiaf pour leur disponibilité, leur patience, et surtout leurs conseils qui nous ont aidés alimenter notre réflexion.

Nous souhaitons également d'adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à nos parents pour leur soutien et leur patience et à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail

*À ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur
exprimer mon amour sincère.*

*A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon
respect : mon cher père **Boukhalat said**.*

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes
exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre Heureuse*

*Mon adorable mère **Bendjafer Hayat**.*

*A mes chères sœurs **Nezhat Ezzaman** et **Mayssa** qui n'ont pas
cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes Études. Que Dieu
les protège et leurs offre la chance et le bonheur.*

*A mon adorable petit frère **Baha Eddine** qui sait toujours comment Procurer la joie et
le bonheur pour toute la famille.*

*Sans oublier mon binôme **Chellali Oussama** pour son soutien moral, son patience
Et son compréhension tout au long de ce projet*



Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents

*Ma mère **Chikhe Aicha** qui a tous sacrifié pour moi et mes frères et sœurs,*

Qui m'a comblé de son amour,

Qui m'a appris que les bonnes choses dans la vie n'arrivent pas facilement

Qui m'a toujours soutenu et conseiller,

Pour toute son assistance et sa présence dans ma vie reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mon éternelle gratitude

*Mon père, **Chellali Makhelofi** à ce bel homme qui a toujours été, et restera toujours mon exemple et mon idole,*

À mon super-héros qui a sacrifié tous ce qu'il pouvait pour nous voir heureux

Je te remercie pour les valeurs nobles et pour ton éducation.

A la source de vie, d'affection source de joie et de bonheur source d'espoir et de motivation

*A **Boukhalat Marwa**, ma chère amie avant d'être binôme*



OUSSAMA

ملخص

تهدف هذه الدراسة أولاً إلى مقارنة سلوك الإنبات لبعض أصناف الكينوا المعرضة لظروف الإجهاد الملحي. تم اختبار أربعة أنواع من الكينوا المزروعة والمُسَوَّقة في الجزائر. ثم درسنا التوصيف المورفولوجيا والبنية على أساس بعض الواصفات المظهرية. تتعلق القياسات التي تم إجراؤها بمعدل بقاء البذور ومعدل الإنبات النهائي. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن الملح له تأثير اكتنابي على معدل الإنبات. ومع ذلك، فإن هذا التأثير يختلف تبعاً لشدة الإجهاد والجهد المعني. لم تتأثر قدرة إنبات الأصناف على مستوى التحكم وعلى مستوى معالجة 100 ملي مولار كلوريد الصوديوم. من ناحية أخرى، يتم منع الإنبات تمامًا على مستوى المعالجات: 150 ملم، 200 ملم، 250 ملم، 300 ملم، 350 ملم و400 ملم من كلوريد الصوديوم لجميع الأصناف. التباين الداخلي المحدد فيما يتعلق بالملوحة كبير نسبيًا. ولكن في ظل وجود 100 ملي مولار من الملح، أظهرت أصناف "Q102" و "Q101" و "Noir" أفضل سلوك إنبات. تليها صنف "الجيزة". الغرض من التجربة التالية هو دراسة التباين الظاهري لأربعة أصناف من الكينوا، زرعت في المحطة التجريبية على مستوى قسم الهندسة الزراعية "جامعة المسيلة" باستخدام عدد قليل من الواصفات. أتاح التنوع المورفولوجيا المستند إلى التصنيف الهرمي التصاعدي التمييز بين فئتين. الصنف الأول يشمل صنفين "أسود وجيزة" والثاني يحتوي على صنفين "Q101" و "Q102" هذه الأخيرة ذات أهمية مؤكدة للتربية وبرامج اختيار الأصناف لتحمل الملح. يمكن أن تعزز المناطق أو المناطق المالحة.

الكلمات الأساسية: الكينوا (*Chenopodium quinoa* L.) ، إجهاد الملح، النسبة المئوية للنمو، نسبة الإنبات، التباين المورفولوجي

RESUME

Cette étude vise tout d'abord à comparer le comportement germinatif de quelques variétés de quinoa, soumises à des conditions de stress salin. Quatre variétés de quinoa cultivées et commercialisées en Algérie ont été testées. Ensuite nous avons étudié la caractérisation morphologique et la structuration sur la base de quelques descripteurs phénotypique. Les mesures effectuées ont concerné le taux de viabilité des graines et le taux de germinations finales. Les résultats obtenus montrent que le sel a un effet dépressif sur le taux de germination. Cependant, cet effet varie en fonction de l'intensité du stress et de la variété en question. La capacité germinative des variétés n'est pas affectée au niveau de témoin et au niveau de traitement 100mM mM de NaCl. Par contre, la germination est complètement inhibée au niveau des traitements : 150 mM, 200 mM, 250 mM, 300 mM, 350 mM et 400 mM de NaCl pour toutes les variétés. La variabilité intra-spécifique vis-à-vis de la salinité est relativement importante. Mais, en présence de 100 mM de sel, les variétés « Q102, Q101 et Noir » a montré le meilleur comportement germinatif. Suivi par la variété « Giza ». L'expérience suivante a pour objet d'étudier la variation phénotypique de quatre variétés du quinoa, semis dans la station expérimentale au niveau de département d'agronomie « université de M'sila » en utilisant quelques descripteurs. La diversité morphologique basée sur la classification ascendante hiérarchique a permis de distinguer 2 classes. Classe 1 regroupe deux variétés « Noir et Giza » et la seconde contient deux variétés « Q101 et Q102 ». Ces dernières présentent un intérêt certain pour les programmes d'amélioration et de sélection variétale pour la tolérance au sel. Elles pourraient valoriser les zones les ou les zones salines.

Mots clé : Quinoa (*Chenopodium quinoa* L.), stress salin, Taux de viabilité, Taux de germination, variabilité morphologique.

ABSTRACT

This study aims first to compare the germination behavior of some varieties of quinoa, subjected to conditions of salt stress. Four varieties of quinoa cultivated and marketed in Algeria were tested. Then we studied the morphological characterization and the structuring based on some phenotypic descriptors. The measurements carried out concerned the seed viability rate and the final germination rate. The results obtained show that salt has a depressive effect on the germination rate. However, this effect varies depending on the intensity of the stress and the strain in question. The germination capacity of the varieties was not affected at the control level and at the 100mM mM NaCl treatment level. On the other hand, germination is completely inhibited at the level of the treatments: 150 mM, 200 mM, 250 mM, 300 mM, 350 mM and 400 mM of NaCl for all the varieties. The intra-specific variability with respect to salinity is relatively large. However, in the presence of 100 mM of salt, the varieties "Q102, Q101 and Noir" showed the best germination behavior. Followed by the variety "Giza". The purpose of the following experiment is to study the phenotypic variation of four varieties of quinoa, sown in the experimental station at the level of the agronomy department "M'sila University" using a few descriptors. The morphological diversity based on the ascending hierarchical classification made it possible to distinguish two classes. Class 1 includes two varieties "Black and Giza" and the second contains two varieties "Q101 and Q102". The latter are of definite interest for breeding and variety selection programs for salt tolerance. They could enhance the areas or saline areas.

Key words: Quinoa (*Chenopodium quinoa* L.), salt stress, percentage viability, percentage germination, morphological variability.

TABLE DE MATIERE

REMERCIEMENTS

RESUME

TABLE DE MATIERE

Liste d'abreviation

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION.....	12
CHAPITRE I : PRESENTATION DE L'ESPECE ETUDIEE QUINOA....	14
1.1. Origine et répartition géographique du Quinoa	14
1.1.1. Origine	14
1.1.2. La domestication	14
1.1.3. Diversification	16
I.2. Description botanique et morphologique.....	17
1.2.1. Description botanique	17
1.2.2. Description morphologies	17
1.3. Physiologie du quinoa	22
1.3.1 Phénologie du quinoa	22
1.3.2. Tolérance à la salinité	23
1.3.3. Résistance à la sécheresse	24
1.3.4. Résistance au froid	25
1.3.5. Résistance aux parasites, maladies et ravageurs	26
1.4. Exigences et technique culturale	27
1.4.1. Exigence cultural	27
1.4.2. Technique culturale	28
CHAPITRE II : STRESS SALIN	31
2.1. Stress salin	31
2.2. Effets morphologique et physiologiques du stress salin sur les plantes	32
2.2.1. Vitesse d'efflux des ions « Type exclude »	34
2.2.2. Vitesse d'influx des ions « type include »	36
2.3. Effet du stress salin sur la germination des graines	37
2.4. Mécanismes de résistance des plantes au stress salin	38

CHAPITRE III : MATERIEL ET METHODES	41
3.1.Objectif	41
3.2. Matériel végétale	41
3.3.Méthode d'étude	41
3.4. Première partie : Effet du stress salin sur l'aptitude germinative de quatre variétés du quinoa (<i>Chenopodium quinoa</i> L.)	42
3.4.1. Germination des graines	41
3.4.2. Les paramètres étudiés	43
3.4.3. Dispositif expérimentale	43
3.4.4. Analyse statistique	
3.5. Deuxième partie : Description morphologiques de quatre variétés du quinoa (<i>Chenopodium quinoa</i> L.) cultivée dans la région de M'sila	44
3.5.1. Etude de milieu	44
3.5.2. Mode et conditions de culture	48
3.5.3. Echantillonnage et paramètres mesurés	48
3.5.4. Analyses statistiques	49
CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS	50
4.1. Taux de germination et viabilité des graines	50
3.2. Deuxième Partie : Caractérisation morphologique de quatre variétés du quinoa cultivée dans la région de M'sila par la classification Hiérarchique Ascendante	53
3.2.2. Analyse de la diversité	53
CONCLUSION	59
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
ANNEXE	

LISTE DES ABREVIATIONS

C : concentration.

CAH : Classification ascendant hiérarchique

Cl⁻ : ion de chlore.

D.S.A: Direction des services agriculture

DDL : Degré de liberté.

FAO: Food and agriculture organization

K⁺ : ion de potassium.

mM : milli mole.

MO : matériel organique

ONM : Organisation national de météo

PPAS : plus petit amplitude significatif.

Prb : probabilité.

S : signification.

T° : température

U.P.O.V: Union internationale pour la protection des obtentions végétales

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Racine du quinoa (personnel, 2021)	18
Figure 1.2 : Plantes du quinoa (personnel, 2021)	19
Figure 1.3 : Feuilles du quinoa (personnel, 2021)	19
Figure 1.4 : Panicule du quinoa (personnel, 2021)	20
Figure 1.5 : Fleurs du quinoa (personnel, 2021)	21
Figure 1.6 : Fruit du quinoa (personnel, 2021)	21
Figure 1.7 : Graine du quinoa (personnel, 2021)	22
Figure 2.1 : Effet délétères liés à la toxicité du stress salin et réponse cellulaire (Munns et Tester, 2008)	32
Figure 2.2 : Illustration schématique du changement de potentiel hydrique du milieu extérieur sur la cellule végétale (Jabnoue, 2009)	34
Figure 2.3 : Effet du stress salin chez la plante (Mahjoubi, 2018)	36
Figure 3.1 : Graines des variétés de quinoa étudiées (<i>Chenopodium quinoa</i> L.)	42
Figure 3.2 : Semis des graines dans des Boite de Pétri	43
Figure 4.1 : Taux de germination de quatre variétés du quinoa en conditions saline	51
Figure 4.2 : Germination des graines en présence de 100 mM de NaCl	51
Figure 4.3 : Classification hiérarchique (CAH) de quatre variétés du quinoa	54
Figure 4.4 : Plants des différentes variétés du Quinoa étudiées	55
Figure 4.5 : Aspect des organes des différentes variétés du Quinoa étudiées	56
Figure 4.6 : Aspect morphologique des différentes variétés du Quinoa étudiées	57

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Phases phénologiques et les étapes morpho-anatomiques pour le quinoa (Espindola, 1992)	23
Tableau 1.2 : Mécanisme de résistance du quinoa a la sécheresse (Mujica et al., 2001)	25
Tableau 1.3 : Mécanismes de résistance du quinoa au froid (Mujica et al., 2001)	26
Tableau 3.1 : Température mensuelle moyenne, minimale et maximale (°C)	45
Tableau 3.2 : Pluviométrie mensuelle (mm)	45
Tableau 3.3 : Normes d'interprétation de taux de la matière organique	46
Tableau 3.4 : Teneur en matière organique	46
Tableau 3.5 : Normes d'interprétation du calcaire total	47
Tableau 3.6 : Teneur en calcaire totale et active	47
Tableau 3.7 : Caractéristiques physico-chimiques du sol	48
Tableau 4.1 : Pourcentage de viabilité et taux de germination de quatre variétés du quinoa en conditions saline	50
Tableau 4.2 : Classification des variétés du quinoa étudiées en groupes homogènes, selon le test Newman-Keuls, pour le paramètre «taux de germination»	52

INTRODUCTION

Le quinoa (*Chenopodium quinoa* L. est considéré pseudocéréale, plutôt qu'une véritable céréale, car ce n'est pas une herbe (une graminée). Il fait partie de la famille des *Amaranthaceae* (classification phylogénétique) ou de celle des *Chenopodiaceae* (classification de Cronquist), constituait un des aliments de base des peuples andins avant les Incas. Traditionnellement, les graines de quinoa sont grillées, puis transformées en farine pour faire différents types de pains, peut aussi être ajouté aux soupes, utilisé comme une céréale, transformé en pâtes, boisson traditionnelle des Andes. Cuit, il a un goût de noisette (FAO, 2013). Le quinoa a été l'un des produits les plus dynamiques du commerce mondial au cours des dernières années » (FAO, 2015).

Comme toutes les cultures, le quinoa possède des exigences édaphiques notamment la nature du sol et également des exigences climatiques, comme les besoins en eau, en température et en lumière. Il est nécessaire de connaître ses besoins pour assurer un excellent rendement de l'espèce et aussi de développer des méthodes de lutte contre les ravageurs et es maladies infectieuses.

De point de vue économique, en 2011, la superficie dédiée au quinoa, dans les 3 principaux pays producteurs andins, soit la Bolivie, le Pérou et l'Equateur, était de 101'527 hectares, soit environ 90% de la surface ensemencée de quinoa dans le monde (Encyclopedia of food grains, 2016).

La consommation du quinoa en Algérie dépend toujours de l'importation. Cependant, le stress abiotique (salinité, sécheresse, chaleur, froid...) et le stress biotique (maladies, champignons, virus...) constituent une grande limite de la production et du développement du quinoa, qui peuvent agir ensemble ou individuellement.

La salinité est un stress biotique majeur qui affecte la fertilité du sol et la croissance des cultures. Le sel présent dans le sol ou dans l'eau d'irrigation, provoque des dégâts qui se manifestent à plusieurs niveaux, tels que l'aspect morphologique,

physiologique et biochimiques. Effectivement, il cause un retardement de la germination, la croissance végétative, le stade de croissance et du développement (floraison, maturité, ...). Les effets de la salinité varient selon l'intensité du stress, la durée d'application et l'espèce. Evidemment, la survie des plants du quinoa et leur capacité à terminer le cycle de croissance et de développement dans les conditions salines, dépendrait de leurs modalités d'adaptation et leur degré de tolérance au sel, qui diffèrent d'une espèce à une autre, et d'un stade de développement à un autre. Certaines plantes croissent dans des environnements à forte concentrations salines, à cause de la présence de différents mécanismes d'adaptation et de tolérance, d'autres sont cultivées dans des zones à faible concentration salines et sont sensibles au sel. En l'occurrence, la résistance ou la sensibilité de la plante au stress salin reste complexe. Les plantes résistant le sel mettent en œuvre des mécanismes d'adaptations, qui se au stress salin, traduisent par des modifications morphologiques, physiologiques et biochimiques. Ces modifications comprennent des diminutions de la teneur en chlorophylle, des changements dans l'anatomie des feuilles, et des augmentations de la teneur en proline et en sucres soluble.

Ainsi, l'objectif principal de cette étude est de comparer le comportement germinatif de différentes variétés du quinoa, dans des conditions du stress salin pour sélectionner les variétés tolérantes et sensibles pendant la germination et suivi par une description morphologique en se basant sur quelques descripteur phénotypiques de ces différentes variétés.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LE QUINOA

1.1. Origine et répartition géographique du Quinoa

1.1.1. Origine

L'origine du quinoa reste controversée et plusieurs hypothèses ont été formulées. Après avoir envisagé la possibilité d'une origine nord-américaine (**Wilson, 1976, Mujica et al., 2001**), **Wilson (1990)** considère que le quinoa proviendrait de *Chenopodium hircinum* Schrad., une espèce sauvage tétraploïde (4n), présente dans les terres basses de la région andine. Cet ancêtre tétraploïde proviendrait à son tour d'espèces diploïdes (2n) communes dans les Andes comme *Chenopodium carnosolum* Moq., *Chenopodium pallidicaule* Aellen ou *Chenopodium petiolare* Kunth.

1.1.3. La domestication

Les abords du lac Titicaca et Poopó dans les Andes (entre 3600 et 3800 m) sont l'un des principaux centres de civilisation et de domestication des espèces agricoles au monde et le centre d'origine principal du quinoa. Il s'y concentre la plus grande diversité génétique de quinoa sauvage et cultivé. Ces ressources génétiques ont une grande valeur pour l'adaptation du quinoa au changement climatique. Actuellement, la meilleure production se trouve entre 2 500 à 3 800 m, avec des précipitations annuelles comprises entre 250 et 500 mm, et une température moyenne de 5 à 14 °C (**Tapia et al., 2014**).

La domestication du quinoa aurait été domestiquée il y a plus de 7000 ans par les peuples andins. Les plus anciens vestiges de quinoa ont été retrouvés à Ayacucho au Pérou et dataient de plus de 5000 ans avant J.-C., d'autres provenant de Chinchorro dans le Nord du Chili dataient de 3000 avant J.-C., et enfin des traces ont été découvertes en Bolivie datant de 750 avant J.-C. (**Galwey et al., 1990**). Des

CHAPITRE I : PRESENTATION DE L'ESPECE ETUDIEE QUINOA

graines ont été retrouvées en quantité abondante dans des sépultures indigènes à Tiltit et Quillaga au Chili (**Tapia et al., 1979**). D'autres traces archéologiques, consistant en des inflorescences et des graines de quinoa, ont été également trouvées dans des tombes indigènes à Tarapacá, Arica et Calama au Chili, ainsi que dans différentes régions du Pérou. (**Gandarillas, 1979a**).

Le processus de domestication a abouti à une augmentation importante de la taille de la tige, de celle de l'inflorescence et des graines, à la perte des mécanismes de dispersion des graines à maturité, à un positionnement de l'inflorescence en bout de tige et à des niveaux variés de pigmentations (**Bazile and Baudron, 2015**). Ce processus global s'est différencié localement en cinq écotypes qui persistent encore dans les cinq espaces suivants (**Bazile, 2015 ; Fuentes et al. 2012**) :

Écotype (a) Les vallées inter-andines arides ou humides en Colombie, en Équateur, au Pérou et en Bolivie : entre 2000 et 4000 m ; précipitations de 700 à 1500 mm ; température minimale de 3°C ;

Écotype (b) Les Yungas ou terres tièdes de Bolivie tropicale : 1500 à 2000 m ; précipitations de 1000 à 2000 mm ; température minimale de 11°C ;

Écotype (c) Les hautes terres froides du Pérou, de Bolivie et de l'Argentine : 3500 à 4000 m ; précipitations de 400-800 mm ; température minimale 0°C ;

Écotype (d) Les Salares qui sont des sols salés de Bolivie, du Chili et de l'Argentine : tolérance au sel ; 3500 à 3800 m ; précipitations de 250 à 400 mm ; température minimale de -1°C ;

Écotype (e) Les basses terres côtières du Chili généralement à des latitudes au sud du 30° de latitude Sud : adaptation aux jours longs ; souvent moins de 500 m ; précipitations de 800 à 1500 mm ; température minimale de 5°C.

Ces cinq écotypes diffèrent par leur adaptation à l'altitude, leur tolérance à la sécheresse et à la salinité, leur réponse photopériodique et les pratiques agricoles associées (**Bazile, 2015 ; Fuentes et al., 2012**).

1.1.3. Diversification

Une première hypothèse de diversification du quinoa après le processus de domestication montre que les germoplasmes dans chacun des cinq centres de diversité du quinoa associés aux cinq écotypes seraient les descendants d'un pool génétique central de variétés locales domestiquées dans le bassin du lac Titicaca (**Risi et Galwey, 1984**). Une autre hypothèse propose un centre secondaire de diversification, qui prend en compte l'écotype (e) des quinoas au niveau de la mer et de basse altitude, du fait qu'il y a une grande distance génétique entre l'écotype (e) et les quatre autres écotypes (**Bazile, 2015**). Enfin, une nouvelle hypothèse, basée sur des approches moléculaires (marqueurs de type microsatellites SSR, Simple Séquence Repeats) indique que le centre de la diversité génétique du quinoa serait la région montagneuse de l'Altiplano entre le Pérou et la Bolivie, avec un ensemble d'espèces adventices apparentées associées (**Christensen et al., (2007)**). **Christensen et al., (2007)** pensent que le quinoa cultivé a pour origine des espèces diploïdes qui se sont hybridées dont les espèces candidatent comprendraient *Chenopodium pallidicaule* Aellen, *Chenopodium petiolare* Kunth, et *Chenopodium carnosolum* Moq., ainsi que des espèces adventices apparentées tétraploïdes comme *Chenopodium hircinum* Schrad. et *Chenopodium quinoa* spp. *melanospermum* Hunz. (**Mujica et Jacobsen, 2001**).

Le quinoa y présente une distribution spatiale selon un gradient climatique nord-sud et une différenciation en zones agroécologiques principalement liée à l'altitude, qui expliquent sa diversité génétique. Actuellement, sept principales espèces de parents sauvages du quinoa y sont présentes : *C. ambrosioides* L., *C. incisum* Poiret, *C. pallidicaule* Aellen, *C. petiolare* Kunth, *C. hircinum* Schrad., *C. quinoa* ssp. *melanospermum* Hunz. et *C. carnosolum* Moq. Cette diversité de ressources phylogénétiques a une grande valeur pour l'évolution adaptative du quinoa notamment face aux effets du changement climatique.

1.2. Description botanique et morphologique

1.2.1. Description botanique

Dans la classification de Cronquist (**Cronquist, 1981**), le quinoa se trouve dans la famille des **Chénopodiacées (aujourd'hui invalide)**. Depuis 2009, une nouvelle classification phylogénétique ((Family: Amaranthaceae – **APG classification III, 2009**) classe le quinoa dans la famille des Amaranthaceae.

Classification de Cronquist (1981)

Règne Plantae

Division Magnoliophyta

Classe Magnoliopsidae

Sous-classe Caryophyllidae

Ordre Caryophyllales

Famille Chenopodiaceae

Genre Chenopodium

Classification APG III (2009)

Ordre Caryophyllales

Famille Amaranthaceae

Nom binomial

Chenopodium quinoa Willd., 1798

1.2.2. Description morphologies

1.2.2.1. La racine

Le système racinaire du quinoa est très robuste, pivotant, vigoureux, profond, bien ramifié et fibreux, il peut soutenir des plantes de plus de 2 m de hauteur bien que de rares cas d'affaissement des plants aient pu être observés sous l'effet du

poids de leurs panicules, du vent, ou d'une humidité excessive (**Gandarillas, 1979 ; Mujica et al., 2001**). **Pacheco et Morlon, (1978)** ajoutent que la profondeur de la racine est liée à la hauteur de la plante. Des plantes de 1,70 m avec une racine de 1,50 m et d'autres de 90 cm de hauteur avec une racine de 80 cm ont été référencées.



Figure 1.1 : Racine du quinoa (personnel, 2021)

1.2.2.2. La tige

La tige peut être unique ou bien présenter de nombreuses ramifications. Elle est cylindrique au niveau du collet puis devient plus anguleuse à partir des ramifications avec une position alterne des feuilles le long de chacune des quatre faces. sa hauteur varie entre 50 cm et 2 m, son diamètre varie entre 1 et 8 cm selon les variétés et les conditions de culture (**Mujica et al., 2001**). Sa couleur est également très variable. Elle peut être uniformément verte, verte avec des stries violettes ou rouges, verte avec des aisselles colorées (surtout rouges), ou bien uniformément rouge. A l'intérieur de la tige, on trouve une moelle blanche à crème, de texture molle chez les jeunes plants puis devenant spongieuse et aérée à l'approche de la maturité (**Gandarillas, 1979**) (**Figure 1.2**).



Figure 1.2 : Plantes du quinoa (personnel, 2021)

1.2.2.3. Les feuille

Toutes les feuilles sont alternes se composent d'un pétiole et d'un limbe. Les pétioles sont longs, cannelés et fins sur la face supérieure et de longueur variable au sein de la même plante. Les limbes sont plans mais ils peuvent parfois être ondulés. les feuilles supérieures sont petites, d'environ 10 X2 mm, lancéolées ou triangulaires, tandis que les feuilles inférieures sont grandes, jusqu'à 15 x 12 cm, rhomboïdales (en forme de losange) ou triangulaires (**Mujica et al., 2001**) (**Figure 1.3**).

La couleur des feuilles varie en fonction des variétés, elles sont généralement vertes lorsqu'elles sont jeunes (présence de pigments végétaux bétaxanthines) puis elles virent au jaune, rouge ou violet (présence de pigments végétaux bétacyanines) (**Gallardo et al., 1996**) (**Figure 1.4**).

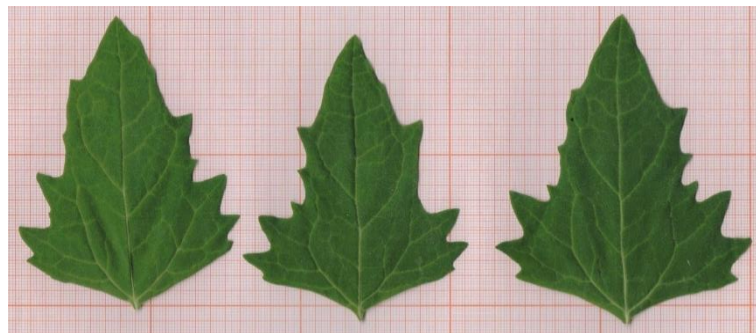


Figure 1.3 : Feuilles du quinoa (personnel, 2021)

1.2.2.4. Les ramifications

Les ramifications naissent sur la tige à l'aisselle de chaque feuille. Leur longueur varie selon les génotypes et les conditions environnementales (climat, type du sol...), allant de quelques centimètres jusqu'à une longueur équivalente à celle de la tige principale (**Jacobsen et Stolen, 1993**). Il existe des variétés très ramifiées (quinoa des vallées), parfois même à partir de la base (quinoa du niveau de la mer), tandis que d'autres présentent une tige unique (quinoa des hautes plaines). Il existe également des variétés intermédiaires (**Mujica et al., 2001**) (**Figure 1.4**).

1.2.2.5. L'inflorescence

L'inflorescence sous forme d'une panicule typique, c'est-à-dire une inflorescence composée d'un axe principal d'où émergent des axes secondaires et tertiaires (**Risi et Galwey, 1984**) (**Figure 1.4**).



Figure 1.4 : Panicule du quinoa (personnel, 2021)

La longueur de la panicule varie selon les génotypes et l'environnement. Elle peut atteindre 30 à 80 cm de long pour 5 à 30 cm de diamètre. Le nombre de glomérules par panicule varie entre 80 et 120 et le nombre de graines par panicule entre 1000 et 3000 (**Mujica et al., 2001**).

1.2.2.6. Les fleurs

Une caractéristique importante chez le quinoa est la présence de fleurs hermaphrodites localisées à l'extrémité proximale et de fleurs femelles localisées à l'extrémité distale d'un groupe (**Hunziker, 1943 ; Valencia-Chamorro, 2003**).



Figure 1.5 : Fleurs du quinoa (personnel, 2021)

La fleur femelle se compose d'un péricône et d'un gynécée. La fleur hermaphrodite est constituée de cinq sépales, d'un pistil avec un ovaire ellipsoïdal et deux ou trois stigmates entourés par l'androcée, lui-même composé de cinq étamines courtes et recourbées (**Gandarillas, 1979**) (**Figure 1.5**).

1.2.2.7. Le fruit

Le fruit est un akène comprenant plusieurs couches, à savoir de l'extérieur vers l'intérieur : péricône, péricarpe et épisperme. Chaque fruit contient une seule graine dont la couleur, la forme et la taille sont variables (**Risi et Galwey, 1984**) (**Figure 1.6**).



Figure 1.6 : Fruit du quinoa (personnel, 2021)

1.2.2.8. La graine

Il existe trois formes de graines : cylindrique, conique et ellipsoïdale ; qui pourraient être réparties dans trois catégories de taille : petite taille (< 1,8 mm), taille moyenne (1,8 à 2,1 mm) et grande taille (2,2 à 2,6 mm) (**Quispe et al., 1976**).



Figure 1.7 : Graine du quinoa (personnel, 2021)

Le périgone se détache facilement à maturation, par lavage ou par frottement à l'état sec bien que, dans certains cas, il peut rester attaché à la graine même après battage (**Gandarillas, 1979 ; Mujica et al., 2001**). Le péricarpe entoure la graine. L'embryon consiste en un axe hypocotyle-radicule et deux cotylédons. L'endosperme est présent dans la région micropylaire (**Mujica et al., 2001**) (**Figure 1.7**).

1.3. Physiologie du quinoa

Le quinoa est tolérante à diverses contraintes abiotiques comme la salinité des sols, la sécheresse, les radiations UV et le gel (**Schlick et al., 1996**).

1.3.1 Phénologie du quinoa

Selon **Tapia et al., (1979)**, le cycle de croissance du quinoa peut être différencié en cinq périodes :

- du semis à l'émergence, 11-57 jours,
- de l'émergence à l'apparition de la première paire de feuilles, 5-9 jours,
- de la première paire de feuilles à l'apparition des panicules, 45-56 jours,
- des panicules à la floraison, 11-31 jours,
- de la floraison à la maturation, 60-109 jours.

CHAPITRE I : PRESENTATION DE L'ESPECE ETUDIEE QUINOA

Différents auteurs ont proposé des échelles pour décrire le développement phénologique du quinoa. **Espindola (1992)** considère les phases phénologiques suivantes (Tableau):

D'autre part, **Espindola (1992)** distingue 9 étapes morpho-anatomiques pour la quinoa, qui sont (**Tableau 1.1**) :

Tableau 1.1 : Phases phénologiques et les étapes morpho-anatomiques pour le quinoa (**Espindola, 1992**)

phases phénologiques du quinoa	étapes morpho-anatomiques pour le quinoa
<ul style="list-style-type: none">– émergence,– deux feuilles véritables,– quatre feuilles véritables,– six feuilles véritables,– ramification,– début de formation de la panicule,– formation de la panicule,– début de la floraison,– floraison ou anthèse,– grain laiteux,– grain pâteux,– maturité physiologique.	<ul style="list-style-type: none">– étape d'émergence,– étape cotylédonaire,– étape des 2 feuilles de base,– étape de 5 feuilles alternes (différenciation paniculaire),– étape de 13 feuilles alternes (pré-émergence paniculaire),– étape d'émergence de la panicule,– étape de floraison,– étape de grain laiteux,– étape de grain pâteux,– étape de grain dur (maturité physiologique).

1.3.2. Tolérance à la salinité

Mujica et al., (2001), montrent que Six à sept jours après l'ensemencement, les graines de génotypes tolérants au sel germent à plus de 75 % à des concentrations salines de 0,6 M de NaCl ($57 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$), ce qui indiquerait que le sel ne provoque pas la mort de l'embryon mais retarde seulement les mécanismes physiologiques et biochimiques impliqués dans l'étape initiale de la germination. Pour la plupart des cultivars, la production est plus élevée dans des conditions

modérément salines que dans des conditions non salines, ce qui fait de la quinoa un halophyte facultatif (**Bosque et al., 2003**).

Les principaux traits relatifs à la tolérance à la salinité rencontrés chez le quinoa (**Adolf et al., 2013**) (tableau) :

- Une meilleure rétention du potassium,
- Une plus haute tolérance aux espèces réactives de l'oxygène (molécules de signalisation clés produites en réponse à un stress et déclenchant une variété de réponses de défense des plantes),
- Et un système de contrôle efficace du développement et de l'ouverture des stomates.
- Un contrôle efficace de l'accumulation de sodium dans le xylème (tissu vasculaire conduisant de l'eau et des nutriments dissous de la racine vers le sommet de la plante, contribuant également à former l'élément ligneux dans la tige) et de la séquestration de sodium dans les vacuoles des feuilles,

1.3.3. Résistance à la sécheresse

La résistance à la sécheresse met en jeu différents mécanismes phénologiques, morphologiques, anatomiques et biochimiques et les principaux traits relatifs à la tolérance à la sécheresse sont les suivants (**Mujica et al., 2001**) (**Tableau 1.2**) :

Tableau 1.2 : Mécanisme de résistance du quinoa a la sécheresse (**Mujica et al., 2001**)

Type de mécanismes	Caractéristique
Phénologiques	-Développement phénologique plus rapide -Raccourcissement de la phase de floraison -Développement racinaire plus rapide dans les premières étapes de croissance -Asynchronisme dans la phase de floraison
Morphologiques	-Repli des feuilles sur la panicule -Réduction de la surface foliaire par perte de feuilles -Plasticité du développement et de la croissance -Réduction de la taille des plantes entière ou des feuilles
Physiologiques	-Plus grande tolérance au sel et plus grande résistance stomatique -Plus grande vitesse d'absorption d'eau -Faible taux de transpiration et récupération rapide des capacités photosynthétiques après une période de sécheresse
Anatomiques	-Plus grand développement racinaire (en densité et profondeur) -Réduction du nombre et de la taille des stomates
Biochimiques	-Translocation des ions K et Ca des cellules stomatiques durant les périodes de sécheresse -Plus grande production d'acide abscissique (ABA)

1.3.4. Résistance au froid

Le **tableau 1.3** présente les principaux traits relatifs à la tolérance au froid rencontré chez le quinoa (**Mujica et al., 2001**):

Tableau 1.3 : Mécanismes de résistance du quinoa au froid (Mujica et al., 2001)

Type de mécanismes	Caractéristique
phénologiques	Phase phénologiques plus tolérantes au froid, prolongation ou raccourcissement des phases phénologiques
Morphologiques	-Chute de feuilles -Réduction de la taille de la plante -Réduction de la taille des feuilles
Physiologiques	-Mouvement des feuilles et de la tige -Osmorégulation de la formation de glace dans l'apoplaste et résistance au sous refroidissement
Anatomiques	-Stomates moins nombreux et plus grands
Biochimiques	-Accumulation de métabolites (sucres solubles, proline et protéines)

1.3.5. Résistance aux parasites, maladies et ravageurs

Mildiou : une maladie causée par un champignon appelé *Peronospora farinosa*. Elle est caractérisée par la présence de lésions chlorotiques sur les surfaces supérieures des feuilles, avec un mycélium blanc ou pourpre sur les surfaces inférieures (Valencia-Chamorro, 2003). Le mildiou est constitué une contrainte importante à la production du quinoa puisqu'il entraîne une baisse de rendement significative.

La fonte des semis (*Rhizoctonia*),

La fusariose (*Fusarium*) ;

La pourriture des semences et la fonte des semis (*Sclerotium rolfsii*, *Pythium zingiberum*) ;

Les tâches foliaires (*Ascochyta hyalospora*) ;

La pourriture brune de la tige (*Phoma exigua* var. *Foveata*) (**Danielsen et al., 2003**) ;

Kcona kcona (*Scrobipalpula* sp.) : petit insecte de l'ordre des lépidoptères (papillons), est probablement le ravageur le plus grave du quinoa. Lorsque les périodes de sécheresse et des températures élevées sont présents. Les larves détruisent d'abord les feuilles et l'inflorescence. Plus tard, lorsque les plantes sont matures, les larves détruisent la panicule et les graines (**Valencia-Chamorro, 2003**) ;

Les oiseaux et les parasites : les graines de quinoa contiennent une forte teneur en saponine, un composant qui les rend moins sensibles à ces attaques grâce à son goût amer et à sa toxicité pour les animaux de petite taille (**Tapia, 2000**).

1.4. Exigences et technique culturale

1.4.1. Exigence cultural

Sol : Le quinoa pousse bien sur des sols limono-sableux a sablo-limoneux et peut être cultivé sur des sols marginaux peu fertiles. En rotation avec la pomme de terre, le quinoa se satisfait de l'engrais organique résiduel de la culture précédente (**Alegria et al., 1999 ; Auza, 2003**). Le quinoa tolère une large gamme de pH du sol, depuis les 27 sols alcalins de la région des salars boliviens (pH 9) jusqu'aux sols acides (pH 4,5) de la région de Cajamarca (Pérou). Il existe des génotypes adéquats pour chacune des conditions extrêmes de pH (**Mujica, 1979**).

Climat : désertique, chaud et sec, froid et sec, tempéré et pluvieux, chaud avec une forte humidité relative, et les régions de la puna et des zones de la Cordillère de haute altitude ; à chaque climat correspondent diverses variétés et écotypes

Eau : La quantité optimale d'eau varie de 200 à 400 mm, en fonction de type du sol et des conditions météorologiques. **Valencia-Chamorro, (2003); Martínez et al., (2009)**, montrent que la culture de quinoa tolère le stress hydrique

et s'adapte bien aux régions où la pluviométrie annuelle avec irrigation se situe entre 250 - 400 mm sur des sols limono-sableux ou sablolimoneux).

Température : Le quinoa est une plante hautement résistante à la sécheresse puisqu'elle tolère des températures élevées allant jusqu'à 35°C (**Oelke et al., 1992**).

Il est admis que la température minimale limite de croissance pour le quinoa est de -5°C (**Bois et al., 2006**) ; certaines variétés du quinoa toléreraient jusqu'à -18°C durant les premiers stades de croissance (**Catacora et Canahua, 1992**). **Lebonvallet (2008)**, montre que le quinoa est très sensible aux fortes températures au stade floraison ; celles supérieures à 35°C peuvent conduire à la dormance et la stérilité du pollen.

Rayonnements solaires : supporte des rayonnements extrêmes, ce qui lui permet d'emmagasiner les heures de chaleur nécessaires pour mener à bien sa phase végétative et productive

Photopériode : Il existe des variétés ou écotypes à jours courts, à jours longs ou indifférents à la photopériode

Altitude : Cultivée depuis le niveau de la mer jusqu'à près de 4000 m d'altitude (**Risi et Galwey, 1989**).

1.4.2. Technique culturale

Choix des variétés : Deux critères sont à prendre en compte : - la sensibilité à la longueur du jour - la teneur en saponine. Les variétés capables de s'adapter chez nous sont celles qui sont peu ou pas sensibles à la longueur du jour. Choisir une variété avec peu ou pas de saponine dans le cas contraire, la graine doit être désaponifiée avant consommation (rinçages successifs).

Le semis : Les semis ont habituellement lieu durant les mois d'août et de septembre mais peuvent être retardés jusqu'à début décembre avec certaines variétés de cycle très court (90 jours). La manière de semer varie selon les régions

de production, se faisant par poquets dans les régions méridionales arides et sur des sillons ou à la volée dans les régions mieux arrosées (**Del Castillo et al., 2008**).

Cycle de culture : Le cycle de culture dure entre 150 et 200 jours selon les régions et les variétés (**Mujica et al., 2001**).

Densité de semis : La densité de semis varie de 5 à 10 kg.ha⁻¹ (100 à 250 plantes par m²) (**Mujica et al., 2001**) avec une profondeur alentours de 3 cm (**Mujica et al., 2001**)

Récolte : La récolte se fait de mars à mai lorsque les plantes ont atteint la maturité physiologique et que le grain est très sec. Si le potentiel de rendement de quinoa atteint 11 t.ha⁻¹, la production maximale obtenue en conditions optimales est d'environ 6 t.ha⁻¹ (**Mujica et al., 2001**), et sur l'Altiplano elle n'est en moyenne que de 0,6 t.ha⁻¹ (**Laguna, 2002**).

Indice de récolte : L'indice de récolte peut être compris entre 0,20 et 0,45, et le poids de 1 000 grains moyen est de 2,30 g (**Felix, 2004**).

1.4.2.1. Système de culture manuel traditionnel

La défriche : en juin et juillet de la première année à lieu la défriche des parcelles qui seront semées l'année suivante. Après la défriche, le terrain repose pendant 6 mois au cours desquels la matière organique va s'incorporer lentement au complexe argilo-humique.

Le labour : le travail du sol est réalisé entre fin janvier et début mars, pendant la saison des pluies, pour éliminer les gros débris végétaux et les adventices ainsi que pour économiser au maximum l'eau du sol.

Le semis : à la fin août de la deuxième année, commence le semis sur les parcelles de pente, mais les dates de semis varient en fonction du climat car le terrain doit être suffisamment humide pour permettre la germination de la graine.

Le contrôle des adventices et des ravageurs : Les jeunes plantules peuvent être recouvertes d'herbes sèches pour limiter l'érosion éolienne et pour empêcher les rongeurs de les manger.

La récolte : une fois que le grain est mûr, en avril-mai, les pieds de quinoa sont coupés ou arrachés selon que le sol est meuble ou non. Ils sont laissés à sécher dans le champ une à deux semaines. Les grains sont ensuite séparés des pieds par battage, puis tamisés sur place.

Le rendement : Les rendements sont de 0,4 à 2 t.ha-1 selon les conditions climatiques.

1.4.2.2. Système de culture mécanisé

Les parcelles cultivées à l'aide de tracteurs. Les sols en plaine sont sableux et profonds, leur mise à nu et leur retournement avec une charrue à disque par les tracteurs entraînent, année après année, une grande fragilité face à l'érosion éolienne et une perte importante de fertilité. L'itinéraire technique (rotation jachère - quinoa) s'effectue le plus souvent sur deux années (**Felix, 2004**).

Le labour : Le labour au tracteur, jusqu'à 40 cm, se fait à la même époque que le travail du sol manuel (mi-janvier à début février), c'est-à-dire pendant la saison des pluies.

Le semis : Le semis au tracteur est réalisé avec un semoir muni d'un soc qui creuse un sillon où sont déposées automatiquement les graines (30 à 50 à la fois) après quoi un versoir situé en arrière vient reboucher le sillon.

Le contrôle des adventices et des ravageurs : les populations de coléoptères et de lépidoptères situés dans les plaines ont augmenté considérablement depuis l'extension des cultures. Les plaines sont tout aussi sujettes aux attaques des rongeurs que les montagnes car même si leur habitat est plutôt dans les zones pierreuses, les très grands blocs de parcelle et la même culture une année sur deux favorisent l'accroissement des ravageurs.

La récolte : elle est identique au système manuel .

CHAPITRE II STRESS SALIN

2.1. Stress salin

Le stress salin est un sérieux problème pour l'agriculture dans les régions arides et semiarides, menaçant la sécurité alimentaire et réduisant les terres cultivables (**Zaman-Allah et al., 2009**). La salinisation du sol peut être naturelle, liée au fort ensoleillement et à la faible pluviométrie, ou induite par les travaux agricoles comme l'utilisation d'engrais chimiques ou les eaux d'irrigation. La concentration élevée de NaCl dans les sols crée un désordre métabolique, une inhibition du développement et de la croissance des plantes (**Djanaguiraman et al., 2013**). Selon leur résistance ou sensibilité au sel, les plantes sont classées en deux grandes classes :

Les glycophytes désignant les plantes qui ne tolèrent pas de fortes concentrations en sel ;

Les halophytes sont toutes les espèces qui poussent sur un sol salé (**Flowers et al., 1986**).

Le degré de résistance ou de sensibilité au stress salin dépend du stade de développement de la plante. Chez certaines espèces, c'est le stade juvénile qui est le plus sensible, alors que chez d'autres espèces, c'est le stade adulte qui est le plus sensible. En effet, la salinité est l'accumulation excessive des sels solubles, ayant pour effets un stress ionique et un stress osmotique (**Mahajan et Tuteja 2005**). Ce stress est dû essentiellement à des concentrations élevées de Na⁺ et de Cl⁻ (**Shahbaz, et al. 2013**). La présence du sodium (Na⁺) dans le sol ou dans le milieu de culture limite l'apport en cations majeurs, tels que le calcium (Ca²⁺) et le potassium (K⁺) (**Zid et Grignon 1991**).

Lors d'un stress osmotique, le développement de la partie racinaire est également affecté, mais il est moins inhibé que celui des parties aériennes

(Rahneshan, Nasibi et Moghadam 2018). Dans ce cas, la synthèse des solutés organiques par la plante est nécessaire à l'ajustement osmotique.

Le stress ionique est, quant à lui, lié à la toxicité de l'ion Na^+ . Une forte concentration de Na^+ dans les cellules végétales perturbe ainsi le métabolisme cellulaire. réponse spécifique aux ions Na^+ se produit en deux phases ; premièrement, l'exclusion des ions Na^+ par les cellules des racines et deuxièmement, la protection des tissus contre l'excès des ions Na^+ dans les tissus des feuilles (Munns et Tester, 2008 ; Wu et al., 2015).

L'exclusion des ions Na^+ par les cellules des racines est la principale réponse protectrice chez les plantes qui retarde les effets toxiques du Na^+ cytoplasmique élevé. En réponse à un dysfonctionnement photosynthétique et respiratoire, la plante produit des espèces réactives à l'oxygène (ROS) (un stress oxydatif) (Mansour, 2013).

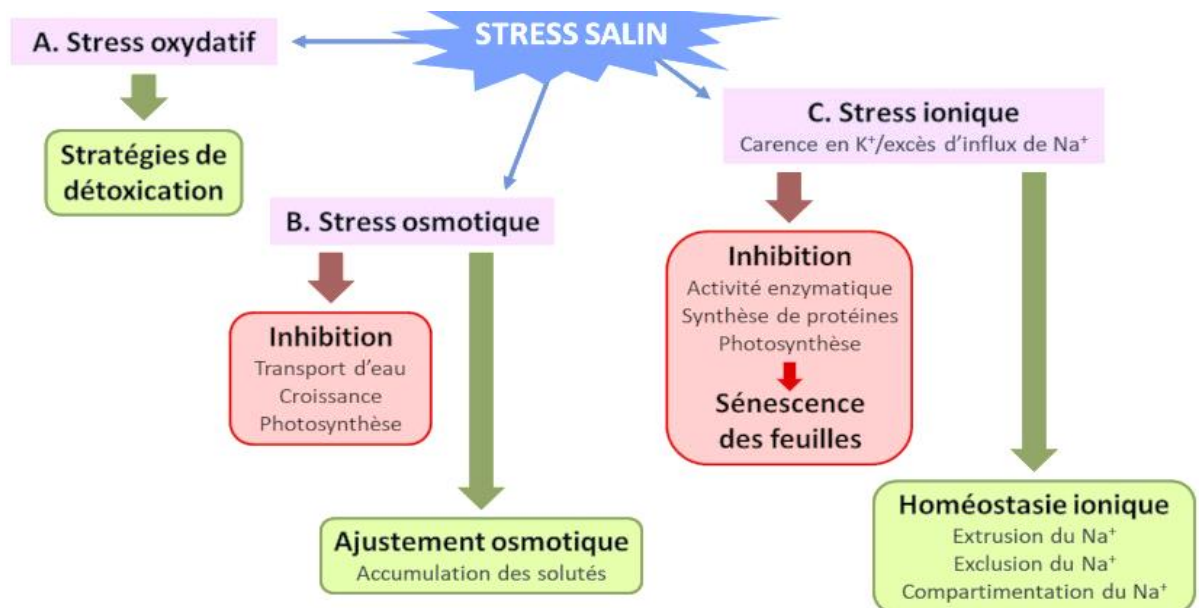


Figure 2.1: Effet délétères liés à la toxicité du stress salin et réponse cellulaire (Munns et Tester, 2008)

2.2. Effets morphologique et physiologiques du stress salin sur les plantes

Les effets du stress salin sur la croissance des plantes sont généralement associés au niveau élevé de toxicité du sodium et au faible potentiel osmotique de

la solution du sol qui provoquent des perturbations sur le développement, la croissance des plantes et sur le métabolisme (**Yamaguchi et Blumwald 2005**).

Le développement d'une stratégie efficace des pratiques de lutte contre le stress salin nécessite une bonne compréhension des effets de la salinité sur les paramètres morphologiques et physiologiques des plantes.

En termes physiologiques, l'effet néfaste du sel (NaCl) du milieu sur la physiologie de la plante peut s'exercer de manières différentes. Une forte concentration de NaCl entraîne une diminution du potentiel osmotique dont l'objectif est d'empêcher le potentiel hydrique cellulaire de devenir supérieur à celui des milieux extérieurs et extracellulaires (**Figure 2.1**). Ce phénomène assure, d'une part, la rétention de l'eau et le maintien de la turgescence cellulaire, et d'autre part la continuité de l'absorption de l'eau du sol, Lorsque l'ajustement osmotique cellulaire n'est pas suffisant, l'eau a tendance à quitter les cellules, ce qui induit une perte de la turgescence et un déficit hydrique (**Gorham et al., 1990**). Ensuite, les fortes doses de NaCl provoquent une altération de la nutrition minérale (**Jacoby, 1994**).

L'effet dépressif du sel accumulé dans les tissus peut se manifester de deux façons :

Il peut se traduire, d'une part, par une toxicité qui survient lorsque sa concentration dans le compartiment cytosolique excède celle qui est compatible avec une activité métabolique normale (**Munns, 1993 ; 2002**).

D'autre part, la saturation de l'apoplasme par le sel «montant» est un autre facteur déterminant de la nécrose et de la mort cellulaire car, par un effet osmotique, le sel concentré dans ce compartiment provoque une sortie d'eau intracellulaire, ce qui conduit à une déshydratation rapide des cellules (**Munns, 1993**).

Deux types de comportement ont pour effet d'éviter la saturation en sel de l'apoplasme: l'influx «includer» et l'eflux «excluser» des ions qui caractérisent aussi bien leur mobilité que leur circulation.

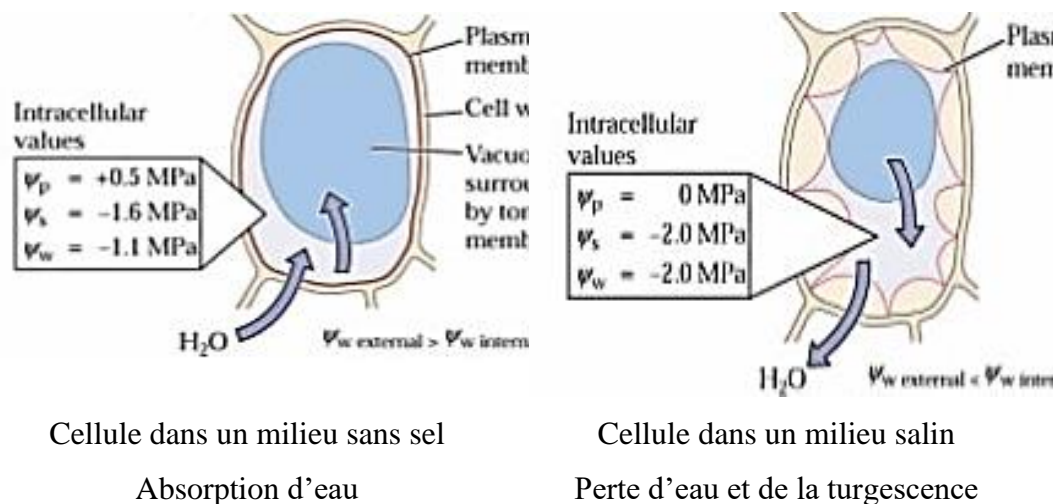


Figure 2.2 : Illustration schématique du changement de potentiel hydrique du milieu extérieur sur la cellule végétale (Jabnour, 2009).

2.2.1. Vitesse d'efflux des ions « Type excluder »

Généralement, les glycophytes sensibles limitent le transport de Na^+ dans leurs organes aériens (Räsänen, 2002).

Sur le plan interspécifique, les espèces incapables de transporter facilement le Na^+ dans leurs feuilles sont nettement plus sensibles que les autres, car leur inaptitude à exporter le Na^+ peut être probablement considérée comme un caractère moins protecteur que le reflet d'une déficience des systèmes de compartimentation cellulaire. En effet, ces espèces semblent peu efficaces pour abaisser le niveau cytoplasmique de Na^+ , ce qui est peut être l'une des causes profondes de leur sensibilité au niveau cellulaire. L'incapacité à débarrasser le cytoplasme du Na^+ est due au caractère de cet ion qui est facilement transporté dans le phloème chez ces plantes (Slama, 1986). Il est donc continuellement ramené vers le bas de la plante. Ce comportement caractérise les plantes exclusives. Ces derniers semblent être dotés d'un mécanisme de protection contre l'envahissement par le sodium par exclusion de cet ion de leurs parties aériennes (Cramer, 1997 ; Rahmoune et al., 2000).

Beaucoup d'arbres peuvent grandir dans les milieux salins ; le faible niveau foliaire du sodium Na^+ de quelques espèces tolérantes à la salinité étudiées suggère que les arbres étaient capables de l'exclusion du sodium Na^+ (Marcar *et al.*, 1991).

L'étude faite par (Van der moezel *et al.*, 1988 ; Lallouche *et al.*, 2017) montre que la plupart des espèces tolérantes à la salinité parmi un grand nombre d'Eucalyptus et Casuarina, cactus exclut le sodium Na^+ et les chlorure Cl^- de leur jeunes pousses en développement. Le site d'exclusion apparaît dans les racines. Les espèces sensibles présentent une faible concentration racinaire en potassium K^+ et une forte absorption du sodium Na^+ . Il y a une évidence mondiale que la capacité d'exclure l'ion (Na^+) et l'ion (Cl^-) de jeunes feuilles est un attribut important d'arbres tolérants la salinité (Bell, 1999 ; Räsänen, 2002, Lallouche *et al.*, 2017).

C'est pourquoi la plus ou moins grande tolérance des plantes dépend notablement de leur aptitude à répartir le sel entre leurs différents organes, compartiments cellulaires et tissus (Kim *et al.*, 2008).

L'aptitude d'exclusion de sodium (Na^+) des parties aériennes est en accord avec la relation négative trouvée entre l'accumulation des ions toxiques (Na^+ et Cl^-) dans la croissance des parties aériennes de Tomate poussant en milieux salins. Le maintien d'une faible concentration de Na^+ dans les feuilles peut être dû à un mécanisme d'exclusion qui provoque une accumulation de Na^+ dans la partie racinaire, évitant une translocation excessive aux tiges ; mais, il peut être aussi lié à une mobilité élevée du Na^+ dans le phloème. Cependant, certaines mesures physiologiques concordent pour suggérer l'existence d'une expulsion active du Na^+ cytoplasmique vers la vacuole ou vers l'apoplasme, protégeant ainsi les équipements enzymatiques du cytoplasme dans la partie aérienne (Greenway *et Munns*, 1980).

L'inhibition de la photosynthèse par le NaCl est l'une des causes de la réduction de la croissance et de la productivité végétale (Wang *et Nil*, 2000). L'accumulation préférentielle du sel dans les cellules des parties aériennes est un caractère déterminant du degré de tolérance de différentes espèces (Maas, 1986).

La réponse des plantes au stress salin est complexe et fait intervenir des voies de réponse diverses (**Figure 2.2**) conduisant à des mécanismes d'adaptation qui induisent un arrêt rapide de la croissance pour une meilleure redistribution des nutriments dans les différents tissus et au rétablissement rapide de la croissance lorsque le stress est levé (**Mahjoubi, 2018**).

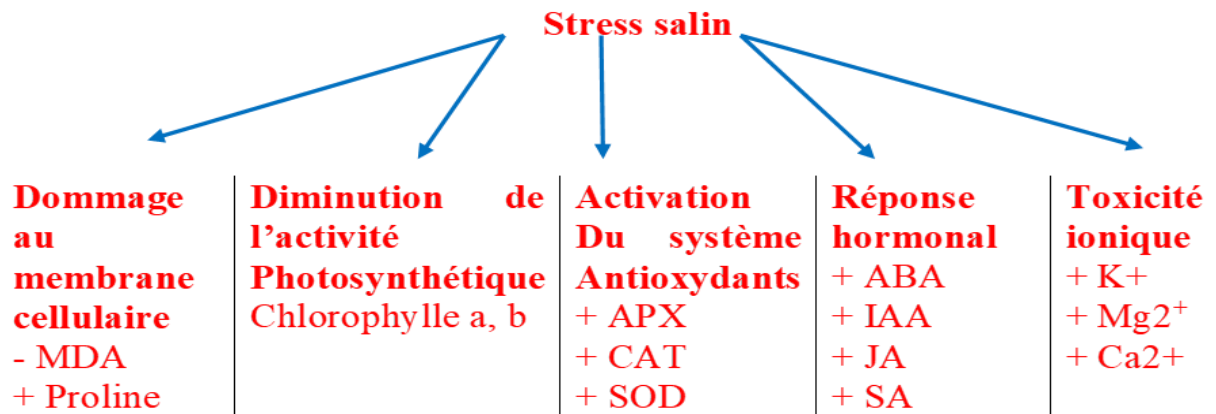


Figure 2.3 : Effet du stress salin chez la plante (**Mahjoubi, 2018**)

2.2.2. Vitesse d'influx des ions « type includer »

Chez les plantes de type « includer », le sodium est piégé et accumulé dans les cellules des parties aériennes, plus particulièrement dans leurs vacuoles (**Räsänen, 2002**). Cependant, l'hypothèse la plus communément admise est que l'entrée de Na⁺ se fait contre son gradient électronique ; l'énergie nécessaire au transport de cet ion serait fournie par le gradient de protons engendré par la pompe à protons du tonoplaste. **Levigneron, (1995)**, signalent que, La vacuole se chargerait ainsi en sodium grâce à l'action d'un antiport sodium-proton Na⁺/H⁺, lequel serait entretenu par le fonctionnement accéléré des pompes à proton Na⁺/H⁺. L'existence d'un système d'échange Na⁺/H⁺ est largement signalé. Il est alors admis que c'est la performance de stocker le sel dans les parties aériennes qui est déterminante dans le niveau de tolérance au sel des espèces.

La concentration foliaire en éléments nutritifs chez *E. microtheca* avant et après le stress salin était semblable ce qui indique sa capacité de contrôle de

l'absorption des sels ou la séquestration des ions toxiques dans les feuilles inférieures qui sont par la suite sénescence (**Bell, 1999**).

Les plantes inclusives associent la résistance à la salinité avec l'aptitude à transporter de grandes quantités de NaCl dans les feuilles. Il semble que ces comportements résultent d'une bonne compartimentation cellulaire du (Na⁺) ; ce qui explique la tolérance à l'accumulation foliaire, et aussi la faible re-circulation de cet ion à travers le phloème (**Tal et al., 1983**).

2.3. Effet du stress salin sur la germination des graines

Malgré l'importance de la germination des graines sous stress salin (**Zhang et al., 2014**), le mécanisme de la tolérance à la salinité chez les graines est relativement mal compris, en particulier en comparaison avec la quantité d'information actuellement disponible sur la physiologie et la biochimie des végétaux de la tolérance à la salinité (**Rivero et al., 2014**).

Bien que, la salinité des sols constitue un facteur limitant en agriculture, car elle inhibe la germination et la croissance de la plantule (**Ben Madani et Belouadah, 2018**).

Selon les mêmes auteurs, la présence de chlorure de sodium entraîne une augmentation de la durée du processus de la germination et retarde par conséquent la levée, car, les stress salin et osmotique sont responsables à la fois de l'inhibition ou un retard de germination et de la levée des graines.

D'autres travaux montrent que l'effet du stress salin sur la germination peut être attribué soit à un effet osmotique et/ou une toxicité des ions spécifiques à l'émergence de la racine ou le développement des semis (**Huang et Redman, 1995**).

D'autres travaux signalent que seul le processus de germination, et non la capacité germinative, est altéré en milieu salé (**Almansouri et al., 2001 ; Khan et al., 2009**).

Le stress salin peut affecter le taux de germination de deux façons :

- en augmentant la pénétration d'ions qui peuvent s'accumuler dans les graines à des doses qui deviennent toxiques.

- en diminuant la vitesse d'entrée et la quantité d'eau absorbée par les graines ;

La survie des plantes, dans un milieu donné, dépend en grande partie de leur réaction au stade de germination et aussi à l'intra spécifique variétale. Chez l'*Atriplex halimus* L., la vitesse de germination est ralentie à partir de 9 g.l⁻¹ de NaCl; est d'avantage inhibée à des concentrations plus élevées, cette inhibition est de nature osmotique (**Khan et al., 2009**).

Cela pourrait expliquer le fait que les graines obtenues à partir de plantes cultivées dans des conditions salines peuvent être plus tolérantes à la salinité que ceux des conditions non saline, mais une telle augmentation de la tolérance n'a pas toujours été observée (**Bewley, 1997**).

Mujica et al., (2001), montrent que six à sept jours après la mise en germination des graines de quelques genotypes du quinoa, les graines de génotypes tolérants au sel germent à plus de 75 % à des concentrations salines de 0,6 M de NaCl (57 mS·cm⁻¹), ce qui indiquerait que le sel ne provoque pas la mort de l'embryon mais retarde les mécanismes biochimiques et physiologiques impliqués dans l'initiation de la germination. Pour la plupart des cultivars, la production est plus élevée dans des conditions modérément salines que dans des conditions non salines, ce qui fait de la quinoa un halophyte facultatif (**Sanchez et al., 2003**).

2.4. Mécanismes de résistance des plantes au stress salin

a. Synthèse des solutés compatibles

La proline et la glycine bêtaïne sont rapportés pour fonctionner dans l'ajustement osmotique, le piégeage des radicaux libres et la protection des macromolécules cellulaires. D'autres solutés compatibles qui s'accumulent dans les

plantes sous stress salin comprennent des glucides tels que les sucres (glucose, fructose, saccharose, fructanes) et de l'amidon (**Parida et al., 2002**).

b. Exclusion et inclusion d'ions

L'élimination du sodium de la compartimentation dans les vacuoles ou du cytoplasme est effectuée par un enzyme anti-sel Na^+ / H^+ inducible par le NaCl (**Apse et al., 2003**). **Hanana et al., (2009)**, ajoutent que, l'inclusion d'ions dans le cytoplasme peut conduire à un ajustement osmotique qui est généralement accepté comme une adaptation biochimique importante à la salinité

c. Modifications de la capacité photosynthétique

La régulation de la biosynthèse du métabolisme et de l'activité de la chlorophylle est primordiale pour les processus physiologiques. Cette régulation de la biosynthèse de la chlorophylle peut être une bonne stratégie de défense.

Depuis la biosynthèse de la chlorophylle est une ramification de la voie de l'acide mévalonique, voie importante du métabolisme secondaire, les voies de ce point clé (α -levulunate) sont probablement détournées vers la biosynthèse des osmolytes compatibles.

d. Contrôle de l'absorption ionique par les racines

Noble et Rogers, (1992), montrent que, un degré plus élevé de tolérance au sel chez les plantes est associé à un système plus efficace pour l'absorption sélective de K^+ sur Na^+ .

e. Induction des hormones végétales

Il existe des preuves de l'implication de l'ABA dans la phosphorylation/réversible des protéines, via des kinases de type CDPK (kinases Ca^{2+} -dépendantes) ou MAPK (Mitogen Activated Protein Kinase) et des phosphates (**Kroniewicz,**

2011). Les effets inhibiteurs du NaCl sur la photosynthèse, la translocation des assimilés et la croissance se sont révélés être atténués par ABA qui agit sur la fermeture et l'ouverture des stomates (**Grondin et al., 2015**).

Sous stress salin, l'augmentation de l'absorption de Ca^{++} est associée à l'élévation de l'ABA et contribue ainsi à l'entretien de l'intégrité membranaire, ce qui permet aux plantes de réguler le transport et l'absorption à des niveaux élevés de salinité externe à plus long terme (**Chen et al., 2001**). L'ABA provoque l'abscission des feuilles probablement en diminuant l'accumulation d'ions Cl^- toxiques dans les feuilles et réduit la libération de l'éthylène (**Gomezcadenas et al., 2002**).

f. Induction d'antioxydants

La synthèse des métabolites secondaires tels que : les polyphénols, le tocophérol, les alcaloïdes, les flavonoïdes et les caroténoïdes permet à la cellule végétale de se protéger contre les agents abiotiques provoqués par les contraintes du milieu, ces mécanismes non-enzymatique maintiennent l'équilibre oxydo-reducteur de la cellule (**Misirli et al., 2001**).

Les plantes possèdent des systèmes efficaces pour éliminer les espèces d'oxygène actif qui les protègent des réactions oxydatives destructrices. Ces mécanismes peuvent être divisés en deux catégories selon l'implication directe ou indirecte des enzymes (**Sofa et al., 2004**).

CHAPITRE III MATERIEL ET METHODES

3.1. Objectif

L'objectif de ce travail est d'évaluer le comportement au stade de germination (aptitude de germination) de quatre variétés du quinoa (*Chenopodium quinoa* L.) cultivées en Algérie en conditions de stress salin et d'analyser le seuil critique au-delà duquel l'espèce ne peut plus survivre suivi par une caractérisation morphologique.

3.2. Matériel végétale

Cet essai a porté sur quatre variétés de quinoa, fournies par l'Institut Technique de Développement de l'Agronomie Saharienne (ITDAS) Ain Ben Naoui Biskra. Ces variétés sont Giza, Q101, Q102 et Noir (Figure 2). D'origine : United States Département of Agriculture (USDA) Département de l'Agriculture des Etats-Unis.

3.3. Méthode d'étude

Les expériences sont réalisées selon deux méthodes distinctes. Une première expérience a portée sur la germination des graines de quatre variétés de quinoa (*Chenopodium quinoa* L.) (Figure 3.1) : **Noir, Q102, Q101 et Giza02** effectuée au laboratoire d'amélioration des plantes au département des sciences Agronomique de la faculté des Sciences à l'université Mohamed Boudiaf - M'sila.



Q noir **Q102** **Q101** **Giza 02**
PMG= 4.552 g **PMG=3.322 g** **PMG= 3.199 g** **PMG= 4.774 g**

Figure 3.1 : Graines des variétés de quinoa étudiées (*Chenopodium quinoa* L.)

Une deuxième expérience a concerné une caractérisation morphologique des plantes de quatre variétés du quinoa (*Chenopodium quinoa* L.) réalisée dans une parcelle située au département des sciences agronomiques à l'université de Mohammed Boudiaf, M'sila.

3.4. Première partie : Effet du stress salin sur l'aptitude germinative de quatre variétés du quinoa (*Chenopodium quinoa* L.)

3.4.1. Germination des graines

Les graines de 4 variétés du quinoa (*Chenopodium quinoa* L.) sont utilisées comme matériel végétal dans cette étude.

Les graines sont traitées à l'eau de javel à 0,5% pendant 3 min, lavées abondamment à l'eau, puis rincées à l'eau distillée afin éliminer toute trace de l'eau de javel. De chaque variété, 10 graines sont semis dans des Boite de Pétri en verre de 10 cm de diamètre, tapissées de deux couche de papier filtre. Dans un cas, nous avons ajouté 10 ml de l'eau distillée (témoin), dans les autres cas, nous avons ajouté 10 ml de solution salines 100 mM, 150 mM, 200 mM, 250 mM, 300 mM, 350 mM de NaCl (stress salin). (**Figure 3.2**). Les boites sont mises dans un incubateur réglé à une température de 25°C. La germination est repérée par l'apparition de la radicule hors des téguments de la graine dont la longueur est d'au moins de 2 mm (**Sayar et al, 2010**).



Figure 3.2 : Semis des graines dans des Boite de Pétri

3.4.2. Les paramètres étudiés

Les paramètres étudiés au cours de ce travail sont :

A. Précocité de germination ou temps de latence : signifie le début de la germination, est exprimé en jours.

B. Taux de germination final ou estimation du taux final de germination (TFG) : ce paramètre constitue le meilleur moyen d'évaluation de la concentration saline qui présente la limite physiologique des graines. Nous calculons le pourcentage final ou maximum des graines germées (N_i) selon la relation :

$$\text{TFG} = N_i \times 100 / N_t$$

N_i = nombre de graines germées

N_t = nombre total de graines utilisées (N_t)

3.4.3. Dispositif expérimentale

Le dispositif expérimental adopté au cours de notre expérimentation est une randomisation totale à deux facteur étudié qui sont : facteur variétés avec quatre variantes (Giza02, Q101, Q102 et Noir), et facteur stress salin avec 7 niveaux ($T_0=0\text{Mm}$, $T_1=100\text{ mM}$, $T_2=200\text{ mM}$, $T_3=300\text{Mm}$, $T_4=400\text{ mM}$, $T_5=500\text{ mM}$ et

T6= 600mM. Chaque essai porte sur 30 graines, soit 3 répétition et chaque répétition comprend 10 graines.

3.4.4. Analyse statistique

Les résultats obtenus sont soumis à l'analyse de la variance à deux facteurs (F1 variétés X F2 doses de NaCl), et les moyennes sont comparées selon le test de Newman-Keuls, basée sur la plus petite différence significative. Chaque moyenne est affectée d'une lettre, les moyennes suivies d'une même lettre n'étant pas significativement différentes.

3.5. Deuxième partie : Description morphologiques de quatre variétés du quinoa (*Chenopodium quinoa* L.) cultivée dans la région de M'sila

3.5.1. Etude de milieu

3.5.1.1. Présentation de la station expérimentale

L'essai est réalisé dans une parcelle située au département des sciences agronomiques à l'université de Mohammed Boudiaf, M'sila. Se localisent entre 35° 74' N et 04° 55' E ; avec 512 m d'altitude.

3.5.1.2. Etude pédoclimatique

3.5.1.2.1. Données climatiques

A. Température

L'analyse des valeurs de la température de l'année 2019, montre que les températures maxima sont enregistrées durant le mois le plus chaud (Juillet) avec une valeur de : 40.4 °C (**Tableau 3.1**).

CHAPITRE III : MATERIEL ET METHODES

Tableau 3.1 : Température mensuelle moyenne, minimale et maximale (°C)

Moi	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
T° Max	12.3	17.8	22.4	25.8	32.9	37.1	40.4	39.9	32.6	26.5	19.0	14.1
T° Min	2.8	6.3	7.7	11.6	18.1	22.0	24.6	25.7	18.5	12.5	6.2	3.4
T° moy	7.55	12.05	15.05	18.7	25.5	29.55	32.5	32.8	25.55	19.5	12.6	8.75

(O.N.M. M'sila 2019)

B. Précipitation

Le cumul annuel moyen de la précipitation de l'année 2019 est 142.2 mm
(Tableau 3.2).

Tableau 3.2 : Pluviométrie mensuelle (mm)

Moi	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Cumul
P (mm)	71.4	1.0	2.5	5.6	13.2	18.0	4.3	0.5	1.5	12.7	4.1	7.4	142.2

(O.N.M. M'sila 2019)

3.5.1.2.2. Analyse physico-chimique du sol

A. Mesure du pH

Le degré d'acidité ou de basicité du sol joue un rôle très important dans l'assimilation des éléments nutritifs du sol par la plante.

Le pH eau, Selon **BAIZE, 1988** :

PH inférieur à 3,5 →hyper-acide pH entre 3,5 et 5 →très acide

PH entre 5 et 6,5 →acide pH entre 6,5 et 7,5→neutre

PH entre 7,5 et 8,7→basique pH supérieur à 8,7 →très basique

CHAPITRE III : MATERIEL ET METHODES

Le pH eau du sol de notre sol d'étude est égal 6.5 rt 7.5, c'est un sol neutre (Tableau 3.7).

B. Dosage de la matière organique

La matière organique est dosée par la méthode. La teneur en matière organique (MO) totale du sol s'obtient généralement en dosant la teneur en carbone (C) (Anne, 1845) (Tableau 3.3).

Tableau 3.3 : Normes d'interprétation de taux de la matière organique

Taux de MO %	Type du sol
<0.5 %	Très pauvre en MO
0.5-1.5 %	Pauvre en MO
1.5-2.5 %	Moyennement pauvre en MO
2.5-6 %	Riche en MO
6-15 %	Très Riche en MO

D'après le tableau ci-dessus, notre sol est moyennement pauvre en MO car il enregistre un pourcentage faible de l'ordre de 1.6 à 1.7% % (Tableau 3.3).

D'après ces normes, notre sol est moyennement pauvre en MO car il enregistre un pourcentage moyennement faible de l'ordre (Tableau 3.4) :

Tableau 3.4 : Teneur en matière organique

Teneur en MO	E2	E3	E4
MO %	1.66%	1.75%	1.66%

A. Dosage du calcaire total (calcimètre de Bernard) (Bernard, 1990)

CHAPITRE III : MATERIEL ET METHODES

Tableau 3.5 : Normes d'interprétation du calcaire total

Calcaire total	Sol
<1 %	Non calcaire
1-5 %	Peu calcaire
5-25 %	Modérément calcaire
25-50 %	Fortement calcaire
50-80 %	Très Fortement calcaire
>80 %	Excessivement calcaire

D'après l'analyse de sol, le taux de calcaire total est compris entre 29.6 e %t 31.6, et selon les normes de tableau ci-dessus, on peut classer notre sol comme sol fortement calcaire (**Tableau 3.6**).

Tableau 3.6 : Teneur en calcaire totale et active

Teneur en calcaire	E2	E3	E4
CaCO ₃ totale	29.6 %	29.7 %	31.6 %
CaCO ₃ active	15 %	22.5 %	23.5 %

B. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique du sol consiste à classer les éléments du sol d'après leur grosseur et à déterminer le pourcentage de chaque fraction (sable, limon et argile) afin de définir la texture d'un sol.

Le **quinoa** pousse bien sur des **sols** limono-sableux à sablo-limoneux. En Amérique du Sud, le **quinoa** est cultivé sur des **sols** peu ou trop drainés, de faible fertilité, très acides (pH 4,8) ou alcalins (pH 8,5). Dans notre cas, on trouve que le sol à une texture argilo-sableuse (**Tableau 3.7**).

Les résultats des analyses physico-chimiques d'un échantillon de sol au niveau du laboratoire des sciences agronomiques, université Mohamed Boudiaf,

CHAPITRE III : MATERIEL ET METHODES

M'sila sont récapitulés dans le tableau 3.7.

Tableau 3.7 : Caractéristiques physico-chimiques du sol

Analyse de sol	Résultats
PH	6.5 à 7.5
Conductivité électrique (CE) ms/cm	0.261
Calcaire totale %	29 % à 31%
Matière organique %	1.75
Texture	argilo-sableuse

3.5.2. Mode et conditions de culture

Le semis a été réalisé le 11 décembre 2021 en suivant un dispositif en randomisation totale à un facteur avec 3 répétitions. Le semis était effectué en lignes, espacées de 100 cm avec un inter-plant de 10 cm pour faciliter les travaux d'entretien et de suivi. Chaque parcelle élémentaire était constituée par une ligne de culture.

3.5.3. Echantillonnage et paramètres mesurés

La caractérisation morphologique des variétés du quinoa a été documentée et suivie du semis jusqu'au stade de maturité des graines (fin du cycle génératif) par des observations qualitatives et des mesures quantitatives sur différentes parties des plantes par variété. Les caractères qui font l'objet de notre étude sont ceux trouvés dans les principaux directeurs pour la conduite de l'examen de la distinction, de l'homogénéité et de la stabilité des caractères du quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*) et admis par l'UPOV (Union internationale pour la Protection des Obtentions Végétales) (**Tableau 3.8**). Dans notre étude, la caractérisation s'est basée sur 10 caractères morphologiques (**Tableau 3.8**)

3.5.4. Analyses statistiques

L'évaluation de la structuration de la variabilité morphologique a été faite par une analyse en composantes principales (ACP) et une classification hiérarchique ascendante (CHA). Le logiciel XL 7.1 (2015) a servi aux analyses.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1. Taux de germination et viabilité des graines

Les graines de quatre variétés du quinoa ont été testées au laboratoire pour confirmer leur viabilité avant d'établir le test de tolérance à la salinité dans les boîtes de Pétri.

L'analyse de la variance ne révèle pas un effet significatif entre les différentes variétés sur le pourcentage de viabilité des graines. (**Figure 4.1 et 4.2**).

Le pourcentage de viabilité des graines était 100% chez les différentes variétés testées (**Tableau 4.1**).

La figure (**4.1 et 4.2**) montre que le taux de germination varie distinctement avec les variétés et les doses de NaCl. Ceci est confirmé par l'analyse de la variance, qui a révélé à la fois un effet très hautement significatif des variétés et des doses de NaCl (**Tableau 4.1**). Il est important de noter que pour toutes les variétés du quinoa étudiées, la germination est complètement inhibée à 150mM, 200mM, 250mM, 300mM, 350 mM et 400Mm de NaCl.

Tableau 4.1 : Pourcentage de viabilité et taux de germination de quatre variétés du quinoa en conditions saline

	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	
Giza	100 ^A	28.5 ^D	O ^E	O ^E	O ^E	O ^E	O ^E	O ^E	O ^E
Q102	100 ^A	51.5 ^C	O ^E	O ^E	O ^E	O ^E	O ^E	O ^E	O ^E
Q101	100 ^A	54.5 ^B	O ^E	O ^E	O ^E	O ^E	O ^E	O ^E	O ^E
NOIR	100 ^A	54.5 ^B	O ^E	O ^E	O ^E	O ^E	O ^E	O ^E	O ^E
Probabilité	0								
Signification	Très hautement significative								

La présence de la même lettre sur les barres d'écarts types indique l'absence de différence significative au seuil d'erreur 5% entre les valeurs correspondantes.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les essais relatifs au comportement de quatre variétés du quinoa sous différentes doses de NaCl ont montré que les graines des différentes variétés étudiées sont moyennement tolérantes et qu'elles sont capables de germer en présence de 100 mM NaCl (**Tableau 4.1 ; Figure 4.1**).

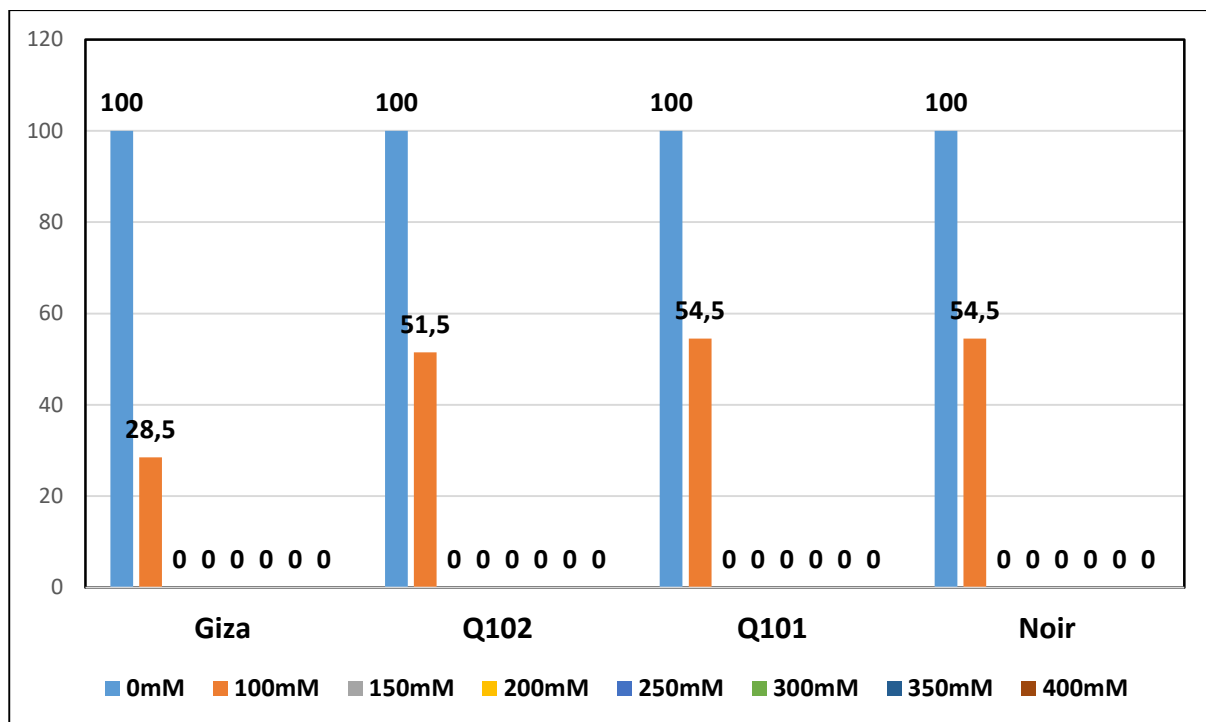


Figure 4.1 : Taux de germination de quatre variétés du quinoa en conditions saline

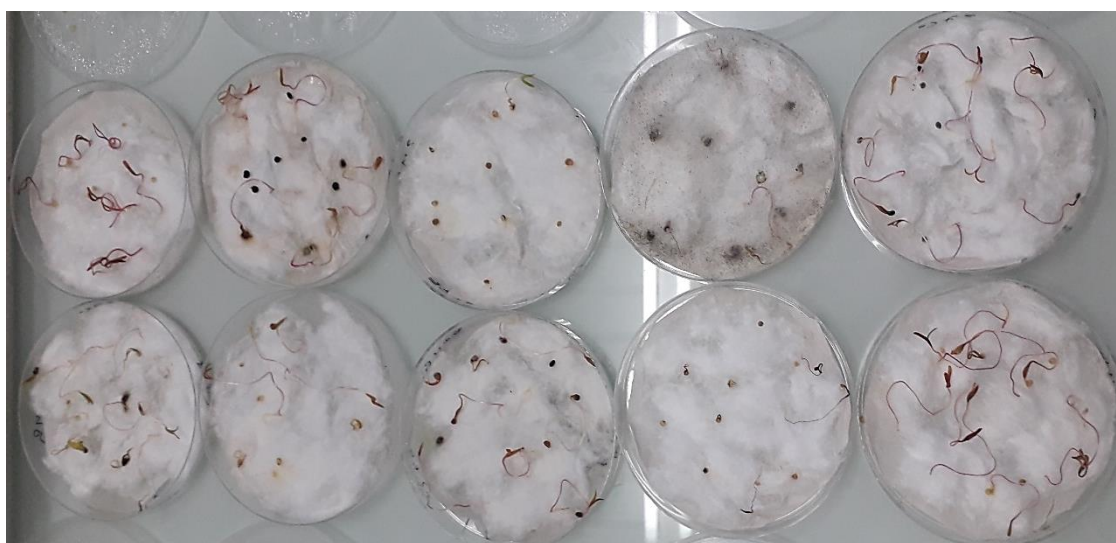


Figure 4.2 : Germination des graines en présence de 100 mM de NaCl

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Le taux de germination pour le témoin et la première dose 100mM de NaCl est pratiquement semblable pour toutes les variétés (Q101, Q102 et Noir), à l'exception de « Giza » (100mM NaCl) qui se distingue de toutes les autres et montrent un taux de germination très significativement faible par rapport au témoin (**Tableau 4.1**).

L'analyse de la variance à l'aide de test de Fisher Snedecor au seuil de 5% montre un effet variétal et dose de NaCl très hautement significatif (**Tableau 4.2**). Aussi la comparaison des moyennes fait ressortir trois groupes homogènes (A, B et C).

Tableau 4.2 : Classification des variétés du quinoa étudiées en groupes homogènes, selon le test Newman-Keuls, pour le paramètre «taux de germination»

Variétés	Moyennes	Groupes homogènes		
Q101	22,071	A		
NOIR	22,071	A		
Q102	21,643		B	
Giza02	18,357			C

Il apparait de la lecture du tableau 3. 2 que les variétés « Q101 et Noir » est significativement les meilleurs, comparativement aux autres variétés. Suivi par la variété « Q102 ». La variété «Giza 02», quant à elle, elle se montre la plus sensible au stress salin.

Discussion

Les résultats rapportés dans la présente étude fournissent des informations pouvant aider à déterminer les variétés du quinoa qui ont une haute tolérance au stress salin (NaCl). Les résultats obtenus montrent clairement que les graines des différentes variétés germent mieux en absence (témoin) et présence de 100 mM de NaCl pour les variétés Q101, Q102 et Noir. Lorsque la concentration de NaCl augmente, une inhibition du pourcentage de graines germées se produit sous la concentration de 150 mM de NaCl. Ceci montre bien que la réponse du quinoa aux

conditions saline au stade de la germination est tributaire de la variété, de la concentration en NaCl du milieu et du paramètre en question. Le quinoa est très sensible aux conditions défavorables pendant la phase de germination, en raison de la petite taille de ses graines (**Jacobsen et al., 1994 ; Sigstad et Prado, 1999**).

Ghrib et al. (2011), signalent que la diminution du pourcentage de germination correspond soit à une augmentation de la pression osmotique externe, ce qui affecte l'absorption de l'eau par les graines ou bien à une accumulation des ions Na⁺ et Cl⁻ dans l'embryon.

Nos résultats se distinguent de ceux de **Brakez et al., (2013)** qui confirment que le quinoa peut germer dans des conditions saline élevé. Cette aptitude de germination en condition saline a été expliquée par **Koyro et Eisa (2008)**, par le fait que la présence de péricarpe qui recouvre la graine joue le rôle d'une barrière pour éviter le passage des ions toxiques à l'intérieur de la graine. Ces résultats viennent confirmer, à travers des études antérieures, les effets relevés exercés par la salinité sur le processus de germination.

3.2. Deuxième Partie : Caractérisation morphologique de quatre variétés du quinoa cultivée dans la région de M'sila par la classification Hiérarchique Ascendante

3.2.2. Analyse de la diversité

Le dendrogramme obtenu par la méthode UPGMA (Unweighed Pair-Group Method with arithmétique Average) montre une nette séparation des variétés et structure la diversité morphologique en deux classes (**Figure 4.3**).

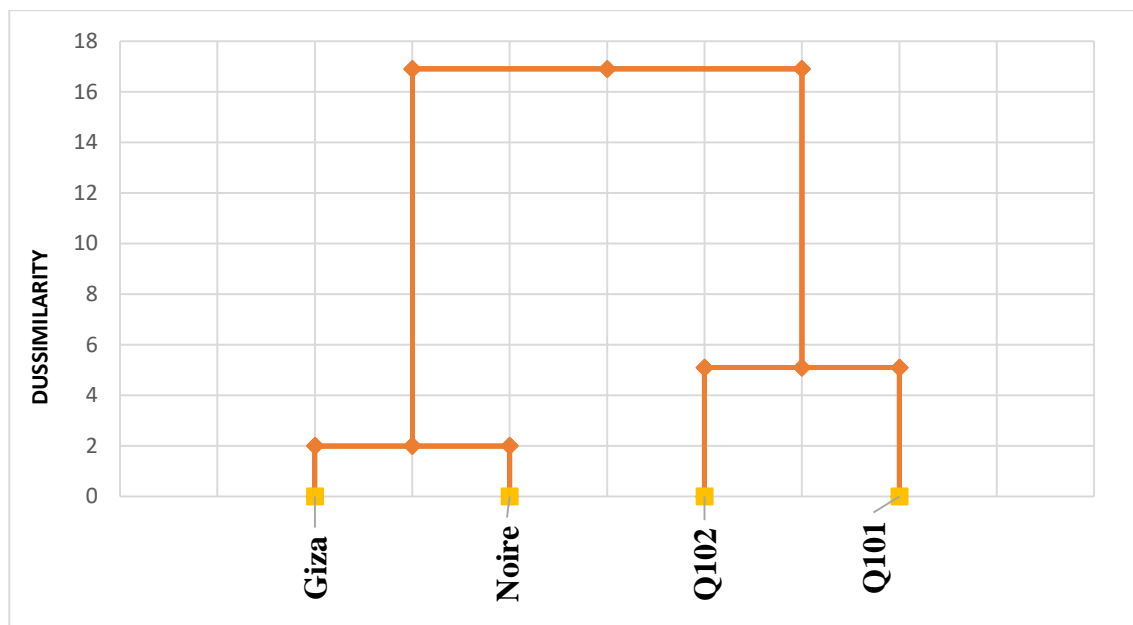


Figure 4.3 : Classification hiérarchique (CAH) de quatre variétés du quinoa

La première classe comprend deux variétés « **Giza** et **noire** », caractérisée par :

Poids de 1000 graines (PD1000G) très élevé ;

Couleur du feuillage (FC) vert foncé (**Figure 4.8**).

La seconde classe regroupe deux (2) variétés **Q101** et **Q102**. Ces deux variétés sont caractérisées par : Couleur du cœur de racine plus claire par rapport à la couleur du cortex (RCDCPRALCDC), teneur moyenne en saponine (GTS), forte glaucescence de feuillage (FG), taille de feuille moyenne (FT), époque de floraison (EDF),

Époque de maturité (PEDM) moyenne chez Q102 et tardive chez Q101 (**Figure 4.3**).



Giza



Noir



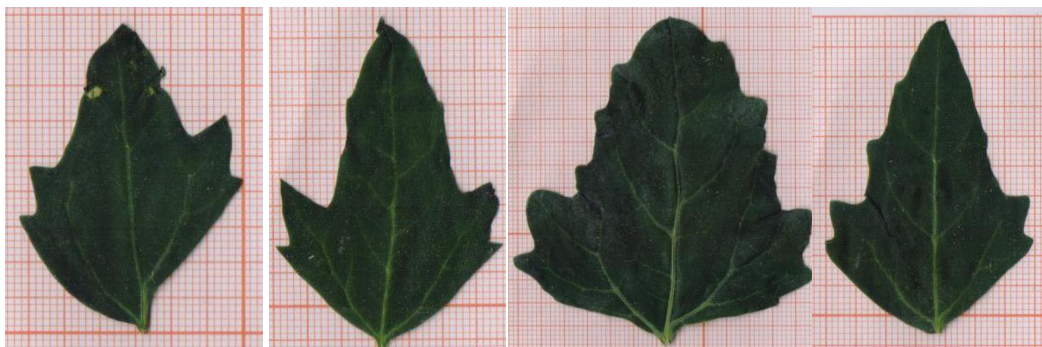
Q101



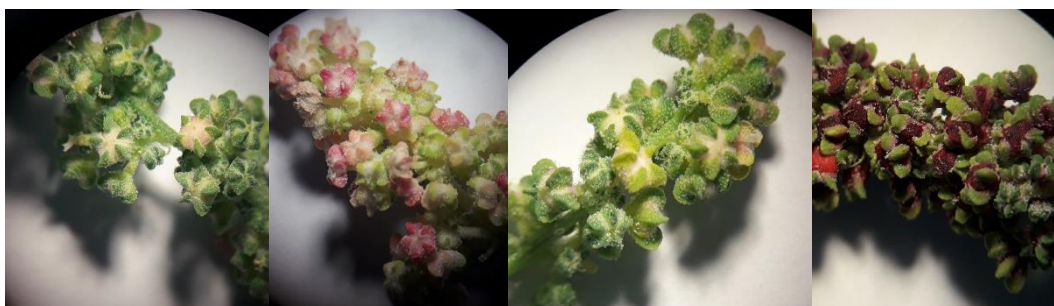
Q102

Figure 4.4 : Plants des différentes variétés du Quinoa étudiées

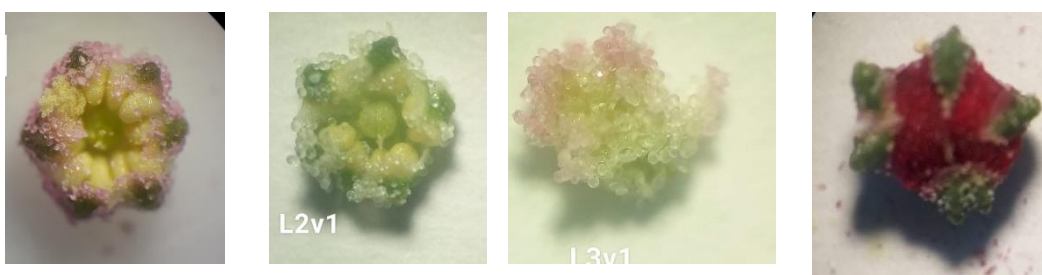
CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS



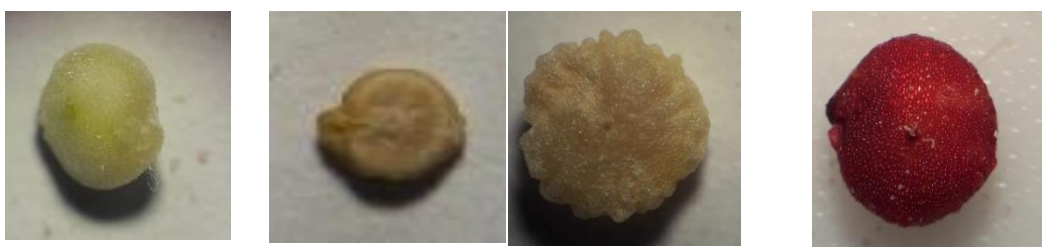
Feuillage : couleur (FC), Feuille : taille (FT), Feuille : dentelure (FD)



Panicule : époque de maturité (PEDM)



Fleur: aspect et couleur



Graine : forme et couleur

Giza

Q102

Q101

Noir

Figure 4.5 : Aspect des organes des différentes variétés du Quinoa étudiées



Figure 4.6 : Aspect morphologique des différentes variétés du Quinoa étudiées

DISCUSSION

La description morphologique est une des étapes importantes dans la classification de la variabilité des plantes cultivées (**Manzano et al., 2001 ; Hadjkouider et al., 2017 ; Lallouche et al., 2020**). En effet, tout programme d'amélioration s'appuie nécessairement sur la diversité du germplasm (**Smith et al., 1991**). Elle permet de mettre à la disposition des améliorateurs et des sélectionneurs des informations capitales, nécessaires pour leurs travaux de sélection et d'amélioration (**Fraleigh, 1987**). Dans ce contexte quatre variétés du semis dans la station expérimentale au département d'agronomie de l'université de M'sila a été étudiée en utilisant dix paramètres morphologiques.

Dans la présente étude, l'analyse de la variabilité morphologique de quatre variétés du quinoa rapportant aux plantes, panicule, feuilles et graines sa permis d'apprécier la variabilité intra-spécifique, d'estimer les distances morphologiques et de dresser un dendrogramme des relations phylogéniques révélées entre ces différentes variétés du quinoa. Cette variabilité phénotypique a été structurée en deux groupes qui se différencient par les caractères suivants : teneur en saponine,

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

poids de 1000 graines (PD1000G), couleur du cœur par rapport à la couleur du cortex, couleur du feuillage, glaucescence de feuillage, époque de floraison, taille de feuille, ainsi que l'époque de maturité.

CONCLUSION

Les graines du quinoa présentent une meilleure habileté à germer sans sel (100%) ou sous stress salin de faible dose (100%). Le sel est donc un facteur limitant qui provoque l'inhibition de la germination de certaines graines du quinoa

Le stress salin a marqué une diminution du pourcentage de germination, cette diminution s'accroît au fur et à mesure, que le stress salin devient important néanmoins, le quinoa a fait preuve d'une remarquable tolérance aux sels.

En effet les trois variétés étudiées (Q101, Q102 et Noir) se sont montrées tolérantes à la salinité avec un comportement germinatif qui diffère d'une variété à autre. La variété qui ressort la meilleure et la plus résistante est Q101, Noir suivie de Q102. En revanche la variété Giza s'affiche comme la plus sensible.

Les descripteurs morphologiques permettent une différenciation facile et rapide entre phénotypes. Ils présentent généralement une forte héritabilité, peuvent être observés facilement à l'œil nu et s'ont également exprimés dans tous les milieux. En outre, ils peuvent inclure un nombre limité de caractères supplémentaires jugés souhaitables par une majorité d'utilisateurs de la plante en question.

La présente étude montre que l'analyse de la diversité génétique de quatre variétés du quinoa à l'aide de descripteurs morphologiques a permis d'apprécier la diversité génétique, d'estimer les distances morphologiques et de dresser un dendrogramme des relations phylogéniques révélées entre ces différentes variétés du quinoa. Cette variabilité phénotypique a été structurée en deux groupes.

Cette étude devrait être complétée par des études sur champ afin de confirmer la tolérance de Q101, Q102 et Noir ou la sensibilité de Giza et la productivité de ces variétés

Il est important d'associer aux caractères phénotypiques marqueurs moléculaires telles que les RAPD et SSR qui permettront de mieux caractériser les variétés et la variabilité intra spécifique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Adolf, V. I., Jacobsen, S. E., & Shabala, S. (2013). Salt tolerance mechanisms in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Environmental and Experimental Botany*, 92, 43-54.

Alegria, S., Espindola, G., & Jacobsen, S. E. (1999). Fertilización nitrogenada de la quinoa en dos épocas y dos espaciamientos de siembra en el Altiplano. *Primer curso internacional sobre fisiología de la resistencia a sequía en quinua*.

Almansouri, M., Kinet, J. M., & Lutts, S. (2001). Effect of salt and osmotic stresses on germination in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *Plant and soil*, 231(2), 243-254.

Anne, L. (1845). Détermination des n derniers chiffres de \sqrt{m} N par une simple division. *Nouvelles annales de mathématiques : journal des candidats aux écoles polytechnique et normale*, 4, 561-564.

Apse, M. P., Sottosanto, J. B., & Blumwald, E. (2003). Vacuolar cation/H⁺ exchange, ion homeostasis, and leaf development are altered in a T-DNA insertional mutant of AtNHX1, the Arabidopsis vacuolar Na⁺/H⁺ antiporter. *The plant journal*, 36(2), 229-239

Auza Camacho, J. I. (2003). *Curvas de crecimiento de quinua (Chenopodium quinoa Willd) y avena (Avena sativa) condiciones diferenciadas de alimentaci= n hfdrica y nutrici= n nitrogeada en la Estaci= n Experimental de Choquenaira* (No. CIDAB-T-SB191. Q2-A81c). Universidad Mayor de San AndrTs, La Paz (Bolivia). Facultad de Agronomfa..

Bazile, D. (2015). *Le quinoa, les enjeux d'une conquête*. Editions Quae.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bazile, D., & Baudron, F. (2015). The dynamics of the global expansion of quinoa growing in view of its high biodiversity.

Ben Madani, R., & Belouadah, A. (2017). *Test de germination dans des conditions de stress salin et caractérisation phénotypique de quelques variétés de la laitue cultivée dans la région de M'sila* (Doctoral dissertation, Université Mohamed BOUDIAF de M'Sila).

Bewley, J. D. (1997). Seed germination and dormancy. *The plant cell*, 9(7), 1055.

Bois, J. F., Winkel, T., Lhomme, J. P., Raffaillac, J. P., & Rocheteau, A. (2006). Response of some Andean cultivars of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to temperature: effects on germination, phenology, growth and freezing. *European Journal of Agronomy*, 25(4), 299-308.

Bosque Sanchez, H., Lemeur, R., Van Damme, P., Jacobsen, S.E., 2003. Ecophysiological analysis of drought and salinity stress of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Rev. Int.* 19, 111–119.

Brakez, M., El Brik, K., Daoud, S., & Harrouni, M. C. (2013). Performance of chenopodium quinoa under salt stress. In *Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation* (pp. 463-478). Springer, Dordrecht.

Cardozo, A., Gandarillas, S. A., & Tapia, M. (1979). *La Quinoa y la Kañiwa, Cultivos Andinos* (No. CD-IBTA- : SB191. Q2-T3q). Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (CIID).

Catacora Ccama, P., & Canahua Murillo, A. (1992). *Avances de investigación sobre la tecnología de waru waru Producción de quinua (*Chenopodium quinoa* Wild) y cañihua (*Chenopodium pillidicaule*) en el agrosistema de camellones* (No. P36 P7a). Programa Interinstitucional de Waru Waru, Lima (Peru) ; Cooperación Técnica del Gobierno Suizo, Lima (Peru).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Chen, S., Li, J., Wang, S., Hüttermann, A., & Altman, A. (2001). Salt, nutrient uptake and transport, and ABA of *Populus euphratica*; a hybrid in response to increasing soil NaCl. *Trees*, 15(3), 186-194.

Christensen, S. A., Pratt, D. B., Pratt, C., Nelson, P. T., Stevens, M. R., Jellen, E. N., ... & Maughan, P. J. (2007). Assessment of genetic diversity in the USDA and CIP-FAO international nursery collections of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) using microsatellite markers. *Plant Genetic Resources*, 5(2), 82-95.

Cramer, G. R. (1997). Uptake and role of ions in salt tolerance.

Cronquist, A., & Takhtadzhian, A. L. (1981). *An integrated system of classification of flowering plants*. Columbia university press.

Danielsen, S., Bonifacio, A., & Ames, T. (2003). Diseases of quinoa (*Chenopodium quinoa*). *Food Reviews International*, 19(1-2), 43-59.

Del Castillo, C., Mahy, G., & Winkel, T. (2008). Le quinoa en Bolivie : une culture ancestrale devenue culture de rente" bio-équitable". *BASE*.

Djanaguiraman, M., Prasad, P. V., Boyle, D. L., & Schapaugh, W. T. (2013). Soybean pollen anatomy, viability and pod set under high temperature stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 199(3), 171-177.

Espindola, G. (1992). Proyecto de fortalecimiento y modernización. IBTA-BM. *Informe anual 1992. Programa quinoa*, 37-42.

FAO, 2015: catalogue of commercial varieties of quinoa in Peru. 71p

FAO. 2013. Quinoa, an ancient crop to contribute to world food security. Working paper produced by PROINPA/FAO. Available at: <http://www.fao.org/quinoa-2013/publications/fr/>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Felix, D. (2004). Diagnostic agraire de la Province Daniel campos, Bolivie. Le développement de la filière quinoa et ses conséquences sur l'équilibre du système agraire des Aymaras de la marca Llica-Tahua. *Agronomie tropicale. Montpellier, CNEARC-ENSAM. Ingénieur agronome, 113.*

Flowers, T. J., M. A. Hajibagheri, and N. J. W. Clipson. "Halophytes." *The quarterly review of biology* 61.3 (1986): 313-337.

Fraleigh, B. (1987). Importance des banques de ressources phytogénétiques. *Amélioration et protection des plantes vivrières tropicales, (Eds) Saint Pierre CA., Demaly Y., AUPELF-UREF, Québec, Canada, 13-18.*

Fuentes, F. F., Bazile, D., Bhargava, A., & Martinez, E. A. (2012). Implications of farmers' seed exchanges for on-farm conservation of quinoa, as revealed by its genetic diversity in Chile. *The Journal of Agricultural Science, 150(6), 702-716.*

Gallardo, M., Jackson, L. E., Schulbach, K., Snyder, R. L., Thompson, R. B., & Wyland, L. J. (1996). Production and water use in lettuces under variable water supply. *Irrigation Science, 16(3), 125-137.*

Galwey, N. W., Leakey, C. L. A., Price, K. R., & Fenwick, G. R. (1990). Chemical composition and nutritional characteristics of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food sciences and nutrition, 42(4), 245-261.*

Gandarillas, H. (1979a). Genética y origen. *Quinoa y Kañiwa, cultivos andinos. Bogota, Colombia, CIID, Oficina Regional para América Latina, 45-64.*

Ghrib, C. D., Gharbi, F., Rejeb, S., Khoudja, L., & Rejeb, M. N. (2011). Tolérance à la salinité de trois espèces d'Eucalyptus aux stades germinatif et plantule. *European Journal of Scientific Research, 50(2), 208-217.*

Gomez-Cadenas, A., Arbona, V., Jacas, J., Primo-Millo, E., & Talon, M. (2002). Abscisic acid reduces leaf abscission and increases salt tolerance in citrus plants. *Journal of Plant Growth Regulation, 21(3), 234-240.*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Gorham, J., Jones, R. W., & Bristol, A. (1990). Partial characterization of the trait for enhanced K^{+} - Na^{+} discrimination in the D genome of wheat. *Planta*, 180(4), 590-597.
- Greenway, H., & Munns, R. (1980). Mechanisms of salt tolerance in nonhalophytes. *Annual review of plant physiology*, 31(1), 149-190.
- Grondin, A., Rodrigues, O., Verdoucq, L., Merlot, S., Leonhardt, N., & Maurel, C. (2015). Aquaporins contribute to ABA-triggered stomatal closure through OST1-mediated phosphorylation. *The Plant Cell*, 27(7), 1945-1954.
- Hadjkouider, B., Boutekrabt, A., Lallouche, B., Lamine, S., & Zoghalmi, N. (2017). Polymorphism analysis in some Algerian *Opuntia* species using morphological and phenological UPOV descriptors. *Botanical Sciences*, 95(3), 391-400.
- Hanana, M., Cagnac, O., Zarrouk, M., & Blumwald, E. (2009). Rôles biologiques des antiports vacuolaires NHX: acquis et perspectives d'amélioration génétique des plantes. *Botany*, 87(11), 1023-1035.
- Huang, J., & Redmann, R. E. (1995). Salt tolerance of *Hordeum* and *Brassica* species during germination and early seedling growth. *Canadian Journal of Plant Science*, 75(4), 815-819.
- Hunziker, A. T. (1943). Las especies alimenticias de *Amaranthus* y *Chenopodium* cultivadas por los indios de América. *Revista Argentina de Agronomía t. 10, no. 4*.
- Jabnour, M. (2009). *Adaptation des plantes au stress salin : caractérisation de transporteurs de sodium et potassium de la famille HKT chez le riz* (Doctoral dissertation, Montpellier SupAgro).
- Jacobsen, S. E., & Stølen, O. (1993). Quinoa-morphology, phenology and prospects for its production as a new crop in Europe. *European Journal of Agronomy*, 2(1), 19-29.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Jacobsen, S. E., Jørgensen, I., & Stølen, O. (1994). Cultivation of quinoa (*Chenopodium quinoa*) under temperate climatic conditions in Denmark. *The Journal of Agricultural Science*, 122(1), 47-52.

Jacoby, B. (1994). Mechanisms involved in salt tolerance by plants. Pessaraki, M. ed., *Handbook of plant and Crop Stress*.

Khan, H. A., Ayub, C. M., Pervez, M. A., Bilal, R. M., Shahid, M. A., & Ziaf, K. (2009). Effect of seed priming with NaCl on salinity tolerance of hot pepper (*Capsicum annuum* L.) at seedling stage. *Soil Environ*, 28(1), 81-87.

Kim, K. C., Lai, Z., Fan, B., & Chen, Z. (2008). Arabidopsis WRKY38 and WRKY62 transcription factors interact with histone deacetylase 19 in basal defense. *The Plant Cell*, 20(9), 2357-2371.

Koyro, H. W., & Eisa, S. S. (2008). Effect of salinity on composition, viability and germination of seeds of *Chenopodium quinoa* Willd. *Plant and Soil*, 302(1), 79-90.

Kroniewicz, L. (2011). *Caractérisation physiologique et fonctionnelle du transporteur anionique ATCLC-C chez Arabidopsis Thaliana* (Doctoral dissertation, Aix-Marseille 2).

Laguna, P. (2002). Competitividad, externalidades e internalidades: un reto para las organizaciones económicas campesinas. *Debate agrario*, (34), 95.

Lallouche, B., Hadjkouider, B., Asma, Beloudah, A., Ben Madani, A., & Ammar, Boutekrabt, A. (2020). Phenotypic characterization of some lettuce cultivars (*lactuca sativa* l.) cultivated in algeria. *Revue Agrobiologia*, 10(1): 1787-96

Lebonvallet, S. (2008). Implantation du quinoa et simulation de sa culture sur l'altiplano bolivien. *Agro Paris Tech, Paris & INRA, Avignon, France*.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Levigneron, A. (1995). Plants toward salt stress. *Cahiers d'Agricultures*, 4, 263-273.
- Maas, E. V. (1986). Salt tolerance of plants. *Applied agricultural research*, 1(1), 12-25.
- Mahajan, S., & Tuteja, N. (2005). Cold, salinity and drought stresses: an overview. *Archives of biochemistry and biophysics*, 444(2), 139-158.
- Mahjoubi, H. (2018). *Nouvelle stratégie d'amélioration de la productivité végétale en condition de stress environnemental via un meilleur contrôle du cycle cellulaire* (Doctoral dissertation, Strasbourg).
- Mansour, M. M. F. (2013). Plasma membrane permeability as an indicator of salt tolerance in plants. *Biologia Plantarum*, 57(1), 1-10.
- Manzano, A. R., Nodals, A. A. R., Gutiérrez, M. I. R., Mayor, Z. F., & Alfonso, L. C. (2001). Morphological and isoenzyme variability of taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) germplasm in Cuba. *Plant genetic resources newsletter*, 31-40.
- Marcar, N. E., Crawford, D. F., & Leppert, P. M. (1993). The potential of trees for utilisation and management of salt-affected land. In *ACIAR proceedings* (pp. 17-17). Australian centre for international agricultural research.
- Martínez, E. A., Veas, E., Jorquera, C., San Martín, R., & Jara, P. (2009). Re-introduction of quinoa into Arid Chile: Cultivation of two lowland races under extremely low irrigation. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 195(1), 1-10.
- Misirli, A., Gülcan, R., Küden, A., & Demir, G. (2001). Determination of phenolic compounds in some almond hybrids varying in resistance to *Pseudomonas amygdali*. *Cahiers Options Méditerranéennes (CIHEAM)*.
- Mujica A., Izquierdo J., Marathee J.P. (2001). Origen y descripción de la quinua. In : Mujica A., Jacobsen S. E., Izquierdo J., Marathee J. P. y FAO, editors. Quinua

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(*Chenopodium quinoa* Willd.): ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro. CIP, UNAP. FAO, CD Cultivos Andinos, version 1.0. Santiago, Chile

Mujica A., 1979. Prácticas agronómicas. In: Tapia M.E. et al., eds. *La Quinoa y la Kañiwa cultivos andinos*. Bogota : CIID-IICA, 91-92.

Mújica, A., & Jacobsen, E. (2001). Biodiversidad un desafío en la región centro oeste de Sudamérica en agricultura andina. *Puno. Perú*.

Munns, R. (1993). Physiological processes limiting plant growth in saline soils: some dogmas and hypotheses. *Plant, Cell & Environment*, 16(1), 15-24.

Munns, R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, cell & environment*, 25(2), 239-250.

Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 59, 651-681.

Noble, C. L., & Rogers, M. E. (1992). Arguments for the use of physiological criteria for improving the salt tolerance in crops. *Plant and soil*, 146(1), 99-107.

Oelke, E. A., Putnam, D. H., Teynor, T. M., & Oplinger, E. S. (1992). Quinoa. Alternative field crops manual. University of Wisconsin Cooperative Extension Service, University of Minnesota Extension Service. *Center for Alternative Plant & Animal Products*.

Pacheco, A., & Morlon, P. (1978). *Los sistemas radiculares de las plantas de interés económico en el Altiplano de Perú*. Mimeo. Puno, Perú.

Parida, A., Das, A. B., & Das, P. (2002). NaCl stress causes changes in photosynthetic pigments, proteins, and other metabolic components in the leaves of a true mangrove, *Bruguiera parviflora*, in hydroponic cultures. *Journal of Plant Biology*, 45(1), 28-36.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Quispe, J. I., Fernandez, C., & Cortes, G. (1976). Contribucion al estudio morfologico del grano de quinua. In *Segunda Convencion Internacional de Quenopodidceas, Potosi, Bolivia*.

Rahmoune, C., Maalem, S., Kadri, K., & Bennaceur, M. (2008). Etude de l'utilisation des eaux fortement salées pour l'irrigation des plantes du genre *Atriplex* en zones semi arides. *Revue des régions arides*, (21), 924-929.

Rahneshan, Z., Nasibi, F., & Moghadam, A. A. (2018). Effects of salinity stress on some growth, physiological, biochemical parameters and nutrients in two pistachio (*Pistacia vera* L.) rootstocks. *Journal of Plant Interactions*, 13(1), 73-82.

Rasanen, L. (2002). *Biotic and abiotic factors influencing the development of N₂-fixing symbioses between rhizobia and the woody legumes Acacia* (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat de l'université de Helsinki. Finlan Oldroyd. 220p).

Risi C, J., & Galwey, N. W. (1984). Chenopodium grains of the Andes: Inca crops for modern agriculture. *Advances in applied biology*.

Rivero, R. M., Mestre, T. C., Mittler, R. O. N., Rubio, F., Garcia-Sanchez, F. R. A. N. C. I. S. C. O., & Martinez, V. (2014). The combined effect of salinity and heat reveals a specific physiological, biochemical and molecular response in tomato plants. *Plant, cell & environment*, 37(5), 1059-1073.

Sanchez, H. B., Lemeur, R., Damme, P. V., & Jacobsen, S. E. (2003). Ecophysiological analysis of drought and salinity stress of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Reviews International*, 19(1-2), 111-119.

Sayar, R., Bchini, H., Mosbahi, M., & Ezzine, M. (2010). Effects of salt and drought stresses on germination, emergence and seedling growth of durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *African Journal of Agricultural Research*, 5(15), 2008-2016.

Schlick G, Bubenheim DL (1996). Quinoa: Candidate crop for NASA's Controlled Ecological Life Support Systems, p 632- 640. In: Janick J (Ed.). *Progress in New Crops*, ASHS Press: Arlington, USA.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Shahbaz, M., Noreen, N., & Perveen, S. (2013). Triaccontanol modulates photosynthesis and osmoprotectants in canola (*Brassica napus* L.) under saline stress. *Journal of Plant Interactions*, 8(4), 350-359.

Sigstad, E. E., & Prado, F. E. (1999). A microcalorimetric study of *Chenopodium quinoa* Willd. seed germination. *Thermochimica acta*, 326(1-2), 159-164.

Slama, F. (1986, September). Effet du nitrate d'ammonium sur le degré de tolérance à une forte dose de NaCl de dix variétés de blé. In *Colloque sur les végétaux en milieu aride, Jerba: Agence de coopération culturelle et technique, Tunis* (pp. 460-473).

Smith, S. E., Al-Doss, A., & Warburton, M. (1991). Morphological and agronomic variation in North African and Arabian alfalfas. *Crop Science*, 31(5), 1159-1163.

Sofo, A., Dichio, B., Xiloyannis, C., & Masia, A. (2004). Effects of different irradiance levels on some antioxidant enzymes and on malondialdehyde content during rewatering in olive tree. *Plant Science*, 166(2), 293-302.

Tal, M., & Shannon, M. C. (1983). Salt tolerance in the wild relatives of the cultivated tomato: responses of *Lycopersicon esculentum*, *L. cheesmanii*, *L. peruvianum*, *Solanum pennellii* and F1 hybrids to high salinity. *Functional Plant Biology*, 10(1), 109-117.

Tapia, M. (2000). Capítulo III: Agronomía de los cultivos andinos. Granos andinos: quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) En: *Cultivos andinos subexplotados su aporte a la alimentación*. C. Moron (Ed). Cultivos andinos 1.0/FAO.

Tapia, M., Canahua, A., & Ignacio, S. (2014). Las Razas de Quinuas en el Perú. *Asociación Nacional de Productos Ecológicos (Anpe) y Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (Concytec)*.

Valencia-Chamorro, S. A. (2003). Quinoa. In *Encyclopedia of Food Science and Nutrition*.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Van der Moezel, P. G., Watson, L. E., Pearce-Pinto, G. V. N., & Bell, D. T. (1988). The response of six Eucalyptus species and Casuarina obesa to the combined effect of salinity and waterlogging. *Functional Plant Biology*, 15(3), 465-474.

Virginia, R. A., & Jarrell, W. M. (1983). Soil properties in a mesquite-dominated Sonoran Desert ecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, 47(1), 138-144.

Wang Y., Nil N. (2000): Changes in chlorophyll, ribulose biphosphate carboxylase-oxygenase, glycine betaine content, photosynthesis and transpiration in Amaranthus tricolor leaves during salt stress. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.*, 75: 623–627.

Wilson, H. D. (1976). Genetic control and distribution of leucine aminopeptidase in the cultivated chenopods (Chenopodium) and related weed taxa. *Biochemical genetics*, 14(11-12), 913-919.

Wilson, H. D. (1990). Quinoa and relatives (Chenopodium sect. Chenopodium subsect. Celluloid). *Economic Botany*, 44(3), 92-110.

Wu, G. Q., Feng, R. J., Liang, N., Yuan, H. J., & Sun, W. B. (2015). Sodium chloride stimulates growth and alleviates sorbitol-induced osmotic stress in sugar beet seedlings. *Plant growth regulation*, 75(1), 307-316.

Yamaguchi, T., & Blumwald, E. (2005). Developing salt-tolerant crop plants: challenges and opportunities. *Trends in plant science*, 10(12), 615-620.

Zaman-Allah, M., Sifi, B., & El Aouni, M. H. (2009). Paramètres agronomiques liés à la tolérance au sel chez le haricot (Phaseolus vulgaris L.). *BASE*.

Zhang, H. J., Zhang, N. A., Yang, R. C., Wang, L., Sun, Q. Q., Li, D. B., ... & Guo, Y. D. (2014). Melatonin promotes seed germination under high salinity by

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

regulating antioxidant systems, ABA and GA 4 interaction in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Journal of pineal research*, 57(3), 269-279.

Zid, E., & Grignon, C. (1991). Les tests de sélection précoce pour la résistance des plantes aux stress. Cas des stress salin et hydrique. In *L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides, deuxièmes journées scientifiques du réseau Biotechnologies végétales, Tunis, 4-9 décembre 1989* (pp. 91-108).

ANNEXE

Tableau d'analyse de variance taux de germination de quatre variétés du quinoa en conditions saline

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	74031,93	55	1346,035				
VAR.FACTEUR 1	135,641	3	45,214	632,99	0		
VAR.FACTEUR 2	73080,43	6	12180,07	170521	0		
VAR.INTER F1*2	813,859	18	45,214	633,002	0		
VAR.RESIDUELLE 1	2	28	0,071			0,267	1,27%