



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة قاصدي مرباح – ورقلة
Université Kasdi Merbah-Ouargla
كلية علوم الطبيعة والحياة
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
قسم العلوم الزراعية
Département de Sciences Agronomiques

D'enregistrement

/ / / / /

THÈSE

Pour l'obtention du diplôme de doctorat 3ème cycle LMD

Domaine: Sciences de la Nature et de la Vie
Filière: Sciences agronomiques
Spécialité: Gestion des agrosystèmes

**Contribution à la caractérisation phénotypique de cinq géotypes
de *Chenopodium quinoa* Willd. Pour leur adaptation aux
conditions sahariennes (cas de Ouargla) Algérie.**

THÈSE

Soutenue publiquement le : 02/11/ 2025

Par

MAAMRI Kelthoum

Devant le jury composé de :

SALHI Nesrine	Pr	UKM-Ouargla	Présidente
DJERROUDI-ZIDANE Ouiza	MCA	UKM-Ouargla	Directrice de thèse
BAZILE Didier	Pr	CIRAD-France	Co-directeur
DERAOUI Naima	MCA	UKM-Ouargla	Examinatrice
AZIB Salim	MCA	UKM-Ouargla	Examineur
LAKHDARI Wassima	Pr	INRAA-Touggourt	Examinatrice
ARAFAT Manaa	Pr	Centre biotechnologie - Tunisie-	Invité

Année universitaire : 2025/2026

Remerciements

Ce voyage scientifique, jalonné de défis et de découvertes, n'aurait jamais pu aboutir sans un soutien d'une richesse inestimable. Au-delà des formalités, c'est du plus profond de mon cœur que je souhaite exprimer ma reconnaissance la plus intense à ceux qui ont éclairé ce chemin.

À la Source de toute sagesse

Je rends grâce avant tout à **ALLAH**, le Tout-Puissant, pour Sa bienveillance infinie et Sa miséricorde. C'est par Sa Volonté, Sa guidance et la force qu'Il m'a octroyée que j'ai pu entreprendre et mener à terme ce travail.

À mes directeurs de thèse : Piliers de la connaissance

Mes plus sincères remerciements vont à mes directeurs de thèse, Docteur **DJERROUDI-ZIDANE Ouiza** et Professeur **BAZILE Didier**. Votre expertise lumineuse, votre patience infinie face à mes questionnements, et votre capacité à transformer les obstacles en opportunités ont été les véritables catalyseurs de ce travail. Vous m'avez non seulement transmis le savoir, mais aussi l'esprit critique et la rigueur scientifique. Votre confiance indéfectible, même dans les moments de doute, a été mon plus grand moteur. Je mesure aujourd'hui l'immense privilège d'avoir été guidé(e) par des mentors d'une telle envergure, dont l'exigence a toujours rimé avec la bienveillance.

Je tiens à exprimer ma plus vive reconnaissance à tous les enseignants qui ont jalonné mon parcours universitaire depuis mes débuts. Mes remerciements vont à Mr ; **CHAABENA Ahmed** et **EDDOUD Amar**, et également à Mr **HANNACHI Slimane** sous- directeur de ODAS pour votre soutien indéfectible et vos conseils avisés notamment statistique, pour votre passion pour la transmission du savoir, votre disponibilité et votre encouragement constant ont été les fondations sur lesquelles s'est construite ma curiosité scientifique et ma soif d'apprendre. Merci infiniment à vous pour votre dévouement exceptionnel et votre impact profond sur ma formation.

J'adresse ma profonde gratitude aux membres du jury, professeur (**SALHI Nesrine**), Professeur (**DERAOUI Naima**), MCA (**AZIB Salim**), Professeur (**LAKHDARI Wassima**) et professeur (**ARAFAT Manaa**). Votre lecture attentive et vos critiques constructives ont permis d'affiner et d'enrichir ce manuscrit. La qualité de nos échanges a été une source d'apprentissage inestimable, confirmant l'importance de la confrontation des idées pour l'avancement de la science. Je tiens à remercier chaleureusement tous les membres du laboratoire **Bioressource**, et le personnel de **l'exploitation SNV** qui ont créé un environnement de travail stimulant, collaboratif et incroyablement humain.

Ma gratitude s'étend aux institutions (**ITDAS**) dont le soutien a été indispensable à la réalisation de cette thèse. Votre contribution a permis de concrétiser ce projet. Ma gratitude s'étend également à l'ensemble du personnel de **CDARS** et à mes chers collègues de département sol et eaux. Votre soutien quotidien, qu'il soit administratif, technique ou simplement humain, a grandement facilité la réalisation de cette thèse. Merci pour votre aide précieuse, et pour l'atmosphère conviviale qui rend chaque journée de travail plus agréable.

Enfin, ces remerciements ne seraient pas complets sans une dédicace toute particulière à **ma petite et grande famille**, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices silencieux et leur foi inébranlable en mes capacités, pour leur soutien constant et leur présence réconfortante.

Cette thèse est le fruit d'un travail acharné, mais aussi et surtout, d'une collaboration et d'un soutien collectifs. À vous tous, merci du fond du cœur.

MAAMRI KELTHOUM

Liste des abréviations

ANRH : Agence National des Ressources Hydriques

CDARS : Commissariat au Développement de l'Agriculture des Régions Sahariennes

DSA : Direction des Services Agricoles

FAO : Food and Agriculture Organization

ITDAS : Institut Technique de Développement de l'Agriculture Saharienne

Max : Maximum

Min : Minimum

Moy : Moyenne

Nbr : Nombre

ONM : Office National de Météorologie

Qx : Quintaux

TM : Températures mensuelles maximales

Tm : Températures mensuelles minimales

TMM : Température moyenne maximale

T : Tonne

°C : Degré Celsius

***Production scientifique
et activités doctorales***

Articles

- Maamri, K.; Zidane, O.D.; Chaabena, A.; Fiene, G.; Bazile, D. **Adaptation of Some Quinoa Genotypes (*Chenopodium quinoa* Willd.), Grown in a Saharan Climate in Algeria.** Life 2022, 12, 1854. <https://doi.org/10.3390/life12111854>
- Maamri, K., Djerroudi-Zidane, O., Chaabena, A., Bazile, D. (2024). **Evaluation préliminaire des génotypes de quinoa introduits dans la zone saharienne d'Algérie, cas de Ouargla.** Dans : Ksibi, M., *et al.* Avancées récentes en sciences de l'environnement dans les régions euro-méditerranéennes et environnantes (3e édition). EMCEI 2021. Progrès dans la science, la technologie et l'innovation. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43922-3_64

Participations aux séminaires :

➤ Internationaux

1. Communication affichée : « **L'Impact de l'urbanisation sur l'état des palmeraies cas de Ouargla** ». International workshop on dynamic oasis space and its environment (DEOE-2020), organisé le 3 et 4 mars 2020 à l'université KASDI MERBAH Ouargla.
2. Communication affichée : « **L'Etat de lieu et la durabilité de système oasis cas de Ouargla** ». 1st international conference of sustainability of saharan agriculture and water use (SSAWU), organisé le 2 et 3 mars 2020 à l'université echahid Hamma Hakhdhar El Oued.
3. Communication affichée : « **Comportement des génotypes de quinoa introduites en zone saharienne (cas de Ouargla) en Algérie** ». Séminaire international sur les sciences naturelles et de la vie en ligne (webinaire), organisé par international journal of human settlements le 19 et 20 février 2021. <https://www.aneau.org/ijhs/> ISSN : 2588-177
4. Communication orale intitulée : « **Preliminary évaluation of quinoa génotypes introduced in the Saharan zone of Algeria** », 3rd mediterranean conference for environmental integration, organisé par springer nature le 10-13 juin 2021 à Sousse - Tunisie.
5. Communication affichée : « **Evaluation de la culture de quinoa semis dans les conditions arides** », 1er séminaire international webinaire : perturbateurs endocriniens environnement & reproduction" université de Blida le 07-08 juillet 2021.

6. Communication oral intitulée “**Adaptation strategy of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)** to high temperatures under Saharan climate in Algeria”, In the Second International Laayoune Forum on Biosaline Agriculture (LAFOBA2) 14-16 June 2022, Laayoune, Morocco, LAFOBA2 2022, ICBA, Plant MDPI
7. Communication affichée intitulée “**Valuation of Alternative Plants, Degraded & Marginal Lands** » Valorisation de Plantes Alternatives et Terres Dégradées et Marginales-, Université Echahid Hamma Lakhdar-El-Oued Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, VPATDM, 2022, 11 Mai 2022.
8. Communication affichée « **Introduction des nouvelles espèces exotique au sud de l’Algérie- cas de *Quinopodium quinoa* Willd-** » Workshop international sur le Quinoa en Algérie, Université Kasdi Merbah Ouargla, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, (WIQA-24) 26-27 Novembre 2024.

➤ **Nationaux :**

9. Communication affichée : « **l’Evolution de la flore de Sahara dans une zone mise en valeur** », les premières journées nationales des sciences naturelles (jnsn 2020), organisées le 29 et 30 janvier 2020 à l’école supérieure d’Ouargla.
 10. Communication affichée : « **Introduction de quinoa en zone aride (cas de Ouargla) en Algérie**, séminaire national (webinaire), bio-ressources ; nutrition, santé et environnement. Organisé le 17 et 18 mai 2021 par université MOHAMED BOUDIAF DE M’SILA.
- **Co-encadrement mémoire master**: contribution à la caractérisation morpho-physiologique et agronomique de trois variétés/ population de quinoa dans les conditions arides (cas de Ouargla) (2019/2020) -BENZID Ilham et CHIBANI Amna.

Liste des figures

N°	Titre	Page
1	Localisation géographique de la culture de quinoa en Amérique du Sud (d'après National Research Council 1989)	9
2	Différents stades du développement de la plante de quinoa (Mujica et al ; 2021)	10
3	Distribution géographique des écotypes de quinoa (Hinojosa et al., 2018)	13
4	Système racinaire du quinoa (Gandarillas, 1979)	14
5	Forme de la tige principale	14
6	Types des ramifications du quinoa	15
7	Dimension de la feuille (Bioversity International et al, 2013)	16
8	Variation du nombre de dents dans les feuilles de quinoa (Gandarillas, 1979)	16
9	Les formes d'inflorescences du quinoa (Tapia et Fries, 2007)	17
10	Inflorescence amaranthiforme, intermédiaire et glomérulaire (Bioversity International et al, 2013)	17
11	Fleurs hermaphrodites et femelles du quinoa (Gandarillas, 1979)	18
12	Forme du grain (Bioversity International et al, 2013)	20
13	Phases phénologiques du quinoa selon l'échelle de Mujica et Canahua (1989) (Bioversity International et al, 2013).	24
14	Répartition mondiale du quinoa dans le temps : (A) zones de production et d'expérimentation du quinoa et (B) nombre de pays cultivant le quinoa.	29
15	Localisation des premiers sites des essais de cultures de quinoa en Algérie, adapté par ITDA (Institut Technique de Développement de l'Agriculture Saharienne)	30
16	Localisation géographique de Ouargla au sein de la région d'étude	32
17	Digramme Ombrothermique de Gaussen et Bagnouls de la région de Ouargla pour la période 2014-2023.	37
18	Climagramme pluviothermique d'Emberger de la région de Ouargla	37
19	Carte de localisation des sites d'étude (Maamri. 2019)	40
20	Dispositif expérimental adopté (V1 : <i>Santa Maria</i> , V2 : Giza1, V3: Q104, V4 : Q103, V5 : Q102)	41
21	Calendrier de conduite des essais de la culture de quinoa	42

22	Diagramme ombrothermique de Gaussen pour la période octobre avril de la région de Ouargla (désert du Sahara Algérien) pour deux périodes de culture du quinoa (2019-2020 et 2020- 2021)	48
23	Cycle végétatif de quinoa	50
24	Stades phénologiques de quinoa pour le site 1 première année 2019 /2020	57
25	Stades phénologiques de quinoa pour site 2 première année 2019/2020	57
26	Stades phénologiques de quinoa pour le site 1 deuxième année (2020 /2021)	58
27	Stades phénologiques de quinoa pour le site2 deuxième année (2020 /2021)	58
28	Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, permettant de comparer la hauteur des plantes (en cm) entre différents génotypes de quinoa	62
29	Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, permettant de comparer le diamètre de la tige principale (en mm) entre différents génotypes.	64
30	Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour nombre de ramifications primaires de différents génotypes de quinoa.	66
31	Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour la longueur de la panicule de différents génotypes de quinoa.	68
32	Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour le diamètre de la panicule de différents génotypes de quinoa.	69
33	Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour le poids de la matière Frèche de différents génotypes de quinoa.	71
34	Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour le poids de la matière sèche de différentes variétés de quinoa	73
35	Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour le nombre de panicules par plante de différents génotypes de quinoa.	75
36	Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour l'indice de récolte de différents génotypes de quinoa	77
37	Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour nombre de dents par feuille de différents génotypes de quinoa	78
38	Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour la longueur du pétiole de différents génotypes de quinoa.	80
39	Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour la longueur maximale de la feuille(mm) de différents génotypes de quinoa	81
40	Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour largeur maximale de la feuille(mm) de différents génotypes de quinoa.	83
41	Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour la production par plante (g) de différents génotypes de quinoa	85

42	Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour le poids de mille grains (PMG) (g) de différents génotypes de quinoa.	87
43	Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour le diamètre de grains (mm) de différents génotypes de quinoa.	89
44	Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour l'épaisseur de grains (mm) de différents génotypes de quinoa.	91
45	Comparaison de la présence ou absence de ramification entre différents génotypes de quinoa.	92
46	Comparaison des couleurs de panicule a la floraison entre différents génotypes de quinoa.	93
47	Comparaison des couleurs de panicule a la maturité entre différents génotypes de quinoa	95
48	Comparaison des formes des feuilles entre différents génotypes de quinoa.	97
49	Comparaison des types de bords des feuilles entre différents génotypes de quinoa	99
50	Comparaison des formes de panicule entre différents génotypes de quinoa.	101
51	Analyse Factorielle de Données Mixtes (FAMD)	104
52	Températures moyenne mensuelle maximale dans le bas sahara (Ziban – région nord-, Souf – région Est-, Oued righ – région Ouest-, Ouargla-région sud-) au sud-est de l'Algérie pendant la période (1990-2018)	111

Liste des photos

N°	Titre	Page
1	Les semences de quinoa utilisés (de gauche haut à droite : Santa Maria, Giza1, Q104, Q103, Q102)	39
2	Préparation des sites expérimentaux	42
3	Stade levée	51
4	Stade deux vraies feuilles	51
5	Stade quatre vraies feuilles	52
6	Stade six vraies feuilles	52
7	Stade ramification	53
8	Stade début de formation de panicule (DFP)	53
9	Stade panicule (P)	54
10	Stade début de floraison (DF)	54
11	Stade floraison (F)	55
12	Stade grain laiteux (GL)	55
13	Stade grain pâteux (GP)	56
14	Stade maturité physiologique	56
15	Variation de la forme des feuilles des génotypes de quinoa étudiés, cultivés à Ouargla pendant la saison hivernale.	96
16	Variation du bord des feuilles des génotypes de quinoa étudiés, cultivés à Ouargla pendant la saison hivernale	98
17	Variation de forme de panicule des génotypes de quinoa étudiés, cultivés à Ouargla pendant la saison hivernale.	100

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
1	Classification scientifique	10
2	Exigences de température (moy mini) et d'humidité selon les groupes agro-écologiques du quinoa (Tapia, 1997)	11
3	Colorations dans le fruit du quinoa (Bioversity International et al, 2013)	19
4	Mécanismes de résistance du quinoa à la sécheresse (d'après Mujica et al. 2001).	21
5	Mécanismes de résistance du quinoa au froid (d'après Mujica et al. 2001).	22
6	Phénologie de quinoa (selon Tapia et al. (1979), Espindola (1986), (1992) et Mujica et Canahua (1989)	23
7	Composition des grains de quinoa et de blé (g/100g de matière sèche).	27
8	Les teneurs en acides aminés du quinoa par rapport aux normes de la FAO et d'autres aliments.	27
9	Délimitation administrative de la région de Ouargla	33
10	Températures mensuelles maximales, minimales et moyennes en °C à Ouargla pendant la période (2014 - 2023)	34
11	Précipitations mensuelles (mm) à Ouargla (2014-2023)	34
12	Vitesse du vent (km/h) moyennes mensuelles des vents (2014-2023)	35
13	Caractéristiques des génotypes de quinoa utilisés	39
14	Caractères quantitatifs (unité et signification)	44
15	Caractères qualitatifs (signification)	45
16	Caractéristiques physicochimiques du sol	48
17	Caractéristiques physico-chimiques de l'eau d'irrigation	49

Table des matières

REMERCIEMENT	I
LISTE DES ABREVIATIONS	II
PRODUCTION SCIENTIFIQUE ET ACTIVITES DOCTORALE.....	
ARTICLES	IIV
PARTICIPATIONS AUX SEMINAIRES :	IIV
LISTE DES FIGURES	VI
LISTE DES PHOTOS	IIX
LISTE DES TABLEAUX	X
TABLE DES MATIERES	XI
الملخص.....	XV
RESUME	XVI
ABSTRACT.....	XVIII
INTRODUCTION	2
CHAPITRE I - REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	
1. DESCRIPTION DE LA CULTURE DE QUINOA	9
1.1 ORIGINE ET DISTRIBUTION GEOGRAPHIQUE	9
1.2 CLASSIFICATION SCIENTIFIQUE DE L'ESPECE BOTANIQUE	10
1.3 ECOTYPES	12
1.3.1 Quinoa des zones situées au niveau de la mer.....	12
1.3.2. Quinoa des vallées arides (Junín) et des vallées humides (Cajamarca)	13
1.3.3. Quinoa des zones tropicales	13
1.3.4. Quinoa des « Salares » (lacs salés d'altitude)	13
1.3.5 Quinoa des hauts plateaux (Altiplano central et nord)	14
2. MORPHOLOGIE	14
2.1 LES RACINES	14
2.2 LA TIGE	15
2.3 LES RAMIFICATIONS	16
2.4 LES FEUILLES	16
2.5 INFLORESCENCES	18
2.6 LES FLEURS	19
2.7 LES FRUITS ET LES GRAINES.....	20
3. PHYSIOLOGIE DU QUINOA	21

3.1	SENSIBILITE A LA SECHERESSE	21
3.2	SENSIBILITE AU FROID.....	22
3.3	SENSIBILITE A LA SALINITE	23
4.	ETUDE AGRONOMIQUE	24
4.1	PHENOLOGIE DU QUINOA.....	24
4.2.	TECHNIQUES CULTURALES	25
4.2.1	Travail du sol.....	25
4.2.2	Semis	26
4.2.3	Fertilisation.....	26
4.2.4	Récolte.....	26
5	PRINCIPAUX ENNEMIS DU QUINOA	27
6.	VALEUR ALIMENTAIRE.....	27
7.	QUINOA DANS LE MONDE	28
7.1	EXPANSION DE LA CULTURE DE QUINOA AU NIVEAU MONDIAL.....	28
7.2	LE QUINOA EN ALGERIE	30
8.	SUPERFICIE, PRODUCTION, LES PRINCIPAUX PAYS PRODUCTEURS.....	31
CHAPITRE II - PRESENTATION GENERALE DE LA REGION D'ETUDE.....		
1.	SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	33
2.	ETUDE CLIMATIQUE	34
2.1	TEMPERATURE	34
2.2	PRECIPITATION	35
2.3	VENT	36
2.4	DIAGRAMME OMBROTHERMIQUE DE GAUSSEN ET BAGNOULS	36
2.5	CLIMAGRAMME PLUVIOTHEMIQUE D'EMBERGER.....	37
CHAPITRE III - MATERIELS ET METHODE.....		32
1.	MATERIELS	40
2.	DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	42
3.	PHENOLOGIE	44
4.	PARAMETRES ETUDIES	44
5	EXPLOITATION STATISTIQUE DES DONNEES :	46
5.1.	ANALYSES STATISTIQUES UNIVARIEES	47
5.2.	ANALYSE FACTORIELLE DES DONNEES MIXTES (FAMD).....	47
CHAPITRE IV- RESULTATS ET DISCUSSION		39
1.	LE CLIMAT	49
2.	CARACTERISTIQUE DU SOL	49

3. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'EAU D'IRRIGATION.....	50
4. CYCLE DE CROISSANCE (STADES PHENOLOGIQUES)	51
4.1 LEVEE	52
4.2 DEUX VRAIES FEUILLES	52
4.3 QUATRE VRAIES FEUILLES	53
4.4 SIX VRAIES FEUILLES	53
4.5 RAMIFICATION	54
4.6 DEBUT DE FORMATION DE LA PANICULE (DFP).....	54
4.7 PANICULE (P)	55
4.8 DEBUT DE FLORAISON (DF).....	55
4.9 FLORAISON (F)	56
4.10 GRAIN LAITEUX	56
4.11 GRAIN PATEUX	57
4.12 MATURITE PHYSIOLOGIQUE.....	57
5 CARACTERISATION AGRO MORPHOLOGIQUE DES VARIABLES QUANTITATIVES	62
5.1 HAUTEUR DE LA PLANTE	62
5.2 DIAMETRE DE LA TIGE	64
5.3 NOMBRE DE RAMIFICATIONS PRIMAIRES :	65
5.4 LONGUEUR DE PANICULE.....	67
5.5 DIAMETRE DE PANICULE.....	69
5.6 POIDS DE LA MATIERE FRAICHE AERIENNE	71
5.7 POIDS DE LA MATIERE SECHE AERIENNE	72
5.8 NOMBRE DE PANICULE PAR PLANTE	74
5.9 INDICE DE RECOLTE	76
5.10 NOMBRE DES DENTS PAR FEUILLE	78
5.11 LONGUEUR PETIOLE	80
5.12 LONGUEUR MAXIMALE DES FEUILLES.....	81
5.13 LARGEUR MAX DES FEUILLES	83
5.14 RENDEMENT EN GRAINS PAR PLANTE	84
5.15 POIDS DE MILLE GRAINS	86
5.16 DIAMETRE DE GRAINS	88
5.17 EPAISSEUR DE GRAINS	90
6 CARACTERISATION AGRO MORPHOLOGIQUE DES VARIABLES QUALITATIVES	92
6.1 PRESENCE OU ABSENCE DES RAMIFICATIONS.....	92
6.2 COULEUR DE LA PANICULE A LA FLORAISON	94
6.3 COULEUR DE PANICULE A LA MATURITE.....	95
6.4 FORME DES FEUILLES	96

6.5 TYPE DE BORD DE FEUILLE	98
6.6 FORME DES PANICULES.....	100
7. ANALYSE FACTORIELLE DE DONNEES MIXTES (FAMD).....	102
DISCUSSION	106
CONCLUSION.....	117
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :.....	121

المساهمة في تحديد خصائص خمسة أصناف من (*Chenopodium quinoa* Willd). من أجل تأقلمها مع الظروف الصحراوية في الجزائر (حالة ورقلة).

الملخص

استكشفت هذه الدراسة تكيف خمسة أصناف من الكينوا (جيزة، سانتا ماريا، Q102، Q103، Q104) مع الظروف البيئية الزراعية الخاصة بالصحراء الجزائرية، دراسة حالة منطقة ورقلة. أجريت التجربة على مدى سنتين متتاليتين (2020/2019 و 2021/2020) في حقلين يختلفان في درجة ملوحة التربة: الموقع 1 (9.95 ديسي سيمينز/متر) والموقع 2 (0.83 ديسي سيمينز/متر). لوحظت اختلافات كبيرة بين الأصناف فيما يتعلق بالمعايير المورفولوجية، والإنتاجية، ومدة دورة النمو. كما أظهرت الأصناف المدروسة دورة نمو طويلة نسبياً تتراوح بين 143 و 175 يوماً. كشف التحليل الخرائطي لدرجات الحرارة القصوى في الصحراء الجزائرية السفلى أن الزراعة الخريفية هي الفترة المثلى لزراعة الكينوا: شهر سبتمبر لشمال الزيبان، وشهر أكتوبر للمناطق الأخرى (جنوب الزيبان، وادي ريغ، سوف، وورقلة)، وذلك لتجنب درجات الحرارة المرتفعة أثناء الإزهار وبالتالي تحسين إمكانات المحصول.

أتاح التقييم المقارن تحديد بعض الأنماط الوراثية التي تتميز بأداء متفوق للصفات الرئيسية للتكيف، وخاصة إنتاجية الحبوب والكتلة الحيوية الهوائية. أكدت التحاليل الإحصائية أهمية هذه الاختلافات، بينما أبرز استقرار الأداء بين المواقع السلوك الاختياري للنبته (*halophyte facultative*) في التعامل مع الملوحة. بشكل خاص، أظهرت الأنماط الوراثية Q102 و جيزة إنتاجية عالية في الحبوب لكل نبته (20.73 و 11.05 غرام على التوالي) وكذلك في الكتلة الحيوية (الطرية والجافة). في المقابل، تميزت Q103 وسانتا ماريا بجودة بذورها، خاصةً بسمك وقطر أكبر، بالإضافة إلى وزن ألف حبة مرتفع (4.3 و 4.05 غرام على التوالي).

علاوة على ذلك، أظهر التحليل العاملي للبيانات المختلطة (*Analyse Factorielle de Données Mixtes*) وجود علاقة إيجابية بين الإنتاجية لكل نبته والعديد من الصفات المورفولوجية والزراعية، مثل ارتفاع النبته، وقطر الساق، وخصائص الأوراق، والكتلة الحيوية الهوائية، وشكل السنابل. تشير هذه النتائج إلى إمكانات عالية للاختيار المستهدف للأنماط الوراثية. يمثل هذا البحث خطوة أولية أساسية لبرامج الاختيار، من خلال توفير عناصر رئيسية لفهم أفضل للتنوع الجيني، وتحديد الأصناف الواعدة، وتوجيه استراتيجيات تحسين الكينوا في الظروف القاسية للصحراء الجزائرية. وبالتالي، فإنه يساهم في تنويع النظم الزراعية وتعزيز الأمن الغذائي في هذه المناطق. ومع ذلك، لا تزال هناك حاجة لدراسات تكميلية لتعميق التحليل على مستويات أخرى (فسيولوجية، جزيئية، وزراعية)، وللتحقق من استقرار أداء الأصناف في مناطق مناخية زراعية صحراوية أخرى.

الكلمات المفتاحية: *Chenopodium quinoa* Willd ، الأصناف ، تكيف ، الصحراء الجزائرية، تقييم زراعي-مورفولوجي، ورقلة.

Contribution à la caractérisation de cinq génotypes de *Chenopodium quinoa* Willd. Pour son adaptation aux conditions sahariennes en Algérie (cas d'Ouargla).

Résumé

Cette étude a exploré l'adaptation de cinq génotypes de *Chenopodium quinoa* Willd (Giza, Santa Maria, Q102, Q103, Q104) aux conditions agro-écologiques spécifiques du Sahara algérien, en se concentrant sur la région d'Ouargla. Menée sur deux années consécutives (2019/2020 et 2020 /2021), l'expérimentation s'est déroulée en plein champ dans deux sites qui diffèrent par le degré de salinité du sol : site 1(9,95ds/m) et site 2 (0,83ds/m). Des variations inter-génotypiques significatives ont été observées concernant les paramètres morphologiques, le rendement et la durée du cycle de croissance. Les génotypes étudiés ont montré un cycle de croissance relativement long variant de 143 à 175 jours. L'analyse cartographique des températures maximales dans le Bas-Sahara algérien a révélé que le semis automnal constitue la période optimale pour la culture de quinoa : le mois de septembre pour le nord des Ziban, et le mois d'octobre pour les autres régions (sud de ziban, Oued righ, Souf et Ouargla) afin d'éviter les hautes températures pendant la floraison et optimiser ainsi son potentiel de rendement. L'évaluation comparative a permis d'identifier certains génotypes présentant des performances supérieures pour des caractères clés d'adaptation notamment le rendement en grains et la biomasse aérienne. Les analyses statistiques ont confirmé la significativité de ces différences, tandis que la stabilité des performances entre les sites a mis en évidence le comportement halophyte facultative du quinoa. En particulier les génotypes, Q102 et Giza ont montré des rendements élevés en grains par plante (respectivement 20,73 et 11,05g) ainsi qu'en biomasse (fraîche et sèche). A l'inverse, Q103 et *Santa Maria* ce sont distingué par leurs qualité des graines, notamment une plus grande épaisseur et un plus grand diamètre du grain associé à un poids de mille grains élevé, (4,3 et 4,05g respectivement). Par ailleurs, Analyse Factorielle de Données Mixtes a mis en évidence une corrélation positive entre le rendement par plante et plusieurs traits morpho-agronomiques, comme la hauteur de la plante, le diamètre de la tige, les caractéristiques foliaires, la biomasse aérienne et la forme de la panicule. Ces résultats suggèrent un potentiel élevé pour une sélection ciblée des génotypes. Cette recherche représente une étape préliminaire essentielle pour les programmes de sélection, en fournissant des éléments clés pour mieux comprendre la variation génétique, identifier les génotypes les plus prometteurs, et orienter les stratégies d'amélioration du quinoa dans les conditions rigoureuses du Sahara algérien. Elle contribue ainsi à la diversification des systèmes agricoles et au renforcement de la sécurité alimentaire dans ces régions. Cependant, des études

complémentaires restent nécessaires afin d'approfondir l'analyse à d'autres niveaux (physiologique, moléculaire, et agronomique), et de valider la stabilité des performances des génotypes dans d'autres zones agro-climatiques sahariennes.

Mots clés : *Chenopodium quinoa* Willd, génotypes, adaptation, Sahara algérien, évaluation agro-morphologique, Ouargla

Contribution to the Characterization of Five Genotypes of *Chenopodium quinoa* Willd. for Adaptation to Saharan Conditions in Algeria (Ouargla Case Study)**Abstract**

This study investigated the adaptation of five *Chenopodium quinoa* Willd. genotypes (Giza, Santa Maria, Q102, Q103, Q104) to the specific agro-ecological conditions of the Algerian Sahara, with a focus on the Ouargla region. Conducted over two consecutive years (2019/2020 and 2020/2021), the experiment took place in open fields at two sites that differed in soil salinity: Site 1 (9.95dS/m) and Site 2 (0.83dS/m). Significant inter-genotypic variations were observed in morphological parameters, yield, and growth cycle duration. The genotypes studied had a relatively long growth cycle, ranging from 143 to 175 days.

A cartographic analysis of maximum temperatures in the Algerian Low Sahara revealed that autumn sowing is the optimal period for quinoa cultivation. Specifically, planting in September is best for the northern Ziban region, while October is optimal for other regions (southern Ziban, Oued Righ, Souf, and Ouargla). This timing helps to avoid high temperatures during flowering and thus optimizes yield potential.

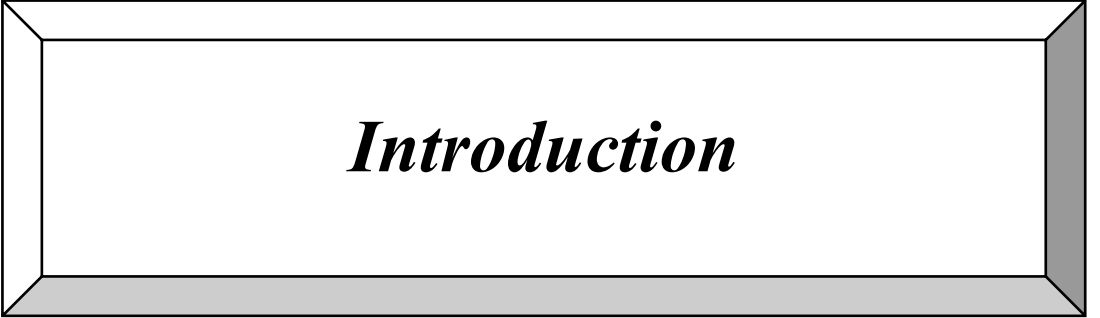
The comparative evaluation identified certain genotypes with superior performance for key adaptation traits, particularly grain yield and aerial biomass. Statistical analyses confirmed the significance of these differences, and the stability of performance between the two sites highlighted quinoa's facultative halophyte behavior. In particular, the genotypes Q102 and Giza demonstrated high yields in both grains per plant (20.73g and 11.05g, respectively) and biomass (fresh and dry). In contrast, Q103 and Santa Maria were distinguished by their seed quality, specifically a greater thickness and diameter, associated with a high thousand-grain weight (4.3g and 4.05g, respectively).

Furthermore, a Mixed Data Factorial Analysis (AFDM) revealed a positive correlation between yield per plant and several morpho-agronomic traits, such as plant height, stem diameter, leaf characteristics, aerial biomass, and panicle shape. These results suggest high potential for targeted genotype selection.

This research represents a crucial preliminary step for selection programs, providing key insights into genetic variation, identifying the most promising genotypes, and guiding strategies for quinoa improvement under the rigorous conditions of the Algerian Sahara. It therefore contributes to the diversification of agricultural systems and the strengthening of food security in these regions. However, complementary studies are still needed to deepen the analysis at

other levels (physiological, molecular, and agronomic) and to validate the stability of genotype performance in other Saharan agro-climatic zones.

Keywords: *Chenopodium quinoa* Willd., genotypes, adaptation, Algerian Sahara, agro-morphological evaluation, Ouargla



Introduction

Introduction

La sécurité alimentaire est l'un des défis les plus critiques auxquels l'humanité est confrontée au XXI^e siècle, notamment dans les régions arides et semi-arides (FAO, 2021), où les conditions climatiques extrêmes limitent considérablement les capacités agricoles. En Algérie, les zones sahariennes, qui couvrent une grande partie du territoire, sont particulièrement vulnérables en raison de leur faible pluviométrie, de leurs températures élevées, de la salinité croissante des sols et des ressources hydriques limitées (Khadhraoui, 2007). Les systèmes agricoles traditionnels de ces zones se révèlent souvent insuffisants pour répondre aux besoins des populations locales (CDARS, 1999). Face à ces contraintes, l'introduction de cultures résilientes et économes en eau représente une solution stratégique pour assurer une production agricole durable afin de renforcer la sécurité alimentaire du pays.

Dans ce contexte, le *Chenopodium quinoa* Willd., communément appelé quinoa, est une espèce cultivée qui suscite un intérêt croissant à l'échelle internationale. Originaire des Andes (Jacobsen, 2003), cette pseudo-céréale est réputée pour sa valeur nutritionnelle exceptionnelle, comprenant une forte teneur en protéines complètes avec tous les acides aminés essentiels, en vitamines et en minéraux (Wright et al, 2002 ; Repo-Carrasco et al, 2003). De plus, le quinoa est doté d'une capacité remarquable à tolérer divers stress abiotiques, tels que la sécheresse, la salinité et les températures extrêmes, ce qui en fait une culture prometteuse pour les environnements marginaux (Jacobsen, 2003 ; Gesinski, 2003). Cependant, bien que le quinoa ait été introduit avec succès dans plusieurs régions du monde, son adaptation aux conditions sahariennes reste peu documentée, particulièrement en Algérie.

La région d'Ouargla, située au sud-est de l'Algérie, constitue un exemple typique d'un environnement saharien caractérisé par des températures pouvant dépasser les 50 °C en été, une très faible pluviométrie annuelle (< 50 mm) et des sols majoritairement sablonneux et souvent salins (Khadhraoui, 2006). Ces conditions représentent des défis spécifiques pour l'introduction de nouvelles cultures, mais elles offrent également une opportunité unique pour tester les capacités d'adaptation de plantes halophytes rustiques comme le quinoa. Cependant, pour garantir la réussite de son introduction, il est essentiel de caractériser l'adaptation des différents génotypes pour déterminer les mieux adaptés aux contraintes spécifiques de cet environnement. Cette démarche permettra non seulement de sélectionner des génotypes performants, mais aussi de contribuer au développement durable de l'agriculture saharienne. Les génotypes de quinoa

présentent une grande diversité génétique, ce qui définit leur comportement face aux contraintes environnementales spécifiques.

Malgré son potentiel élevé, l'introduction du quinoa dans les environnements sahariens algériens reste aujourd'hui limitée par un manque de données scientifiques concernant ses performances agronomiques. Les recherches disponibles se concentrent principalement sur d'autres régions du monde ou en conditions contrôlées. Dans ce contexte, il apparaît essentiel de mener cette première étude ciblée qui vise à contribuer à la caractérisation de cinq génotypes de *Chenopodium quinoa* Willd. Pour leur adaptation aux conditions sahariennes de la région d'Ouargla. Plus spécifiquement, les objectifs spécifiques poursuivis sont les suivants :

1. Caractériser le développement phénologique dans les conditions locales : étude du cycle de croissance des génotypes ciblés.
2. Caractériser le potentiel agronomique : Évaluer les performances des cinq génotypes en termes de croissance, de développement et de rendement sous des conditions sahariennes.
3. Sélectionner les génotypes les plus prometteurs : Identifier les variétés/génotypes les plus adaptées pour contribuer à la diversification des cultures, l'amélioration de la résilience des systèmes agricoles, et une possible vulgarisation agricole dans les zones sahariennes algériennes.
4. Déterminer une stratégie d'adaptation du quinoa face aux fortes températures du Sahara : estimer la période optimale à la croissance de quinoa dans la région de bas Sahara (Ouargla, Oued Righ, Souf, et le Ziban), pour éviter les grandes chaleurs durant les phases critiques de son développement.

Pour répondre à ces objectifs, les hypothèses suivantes sont formulées :

1. Hypothèse principale :

Les génotypes de quinoa testés présentent une capacité d'adaptation différenciée aux conditions sahariennes de Ouargla, en termes de croissance, de rendement et de tolérance aux stress abiotique (notamment la salinité), ce qui permet d'identifier des variétés ou génotypes plus adaptés à ces environnements extrêmes.

2. Hypothèses supplémentaires :

- a. Les génotypes de quinoa présentent une forte plasticité phénotypique, leur permettant d'ajuster leurs traits morphologiques (taille des feuilles, dimension de la graine), en réponse aux conditions sahariennes spécifiques, améliorant ainsi leur capacité d'adaptation
- b. Les génotypes de quinoa adaptés aux conditions sahariennes présentent des performances agronomiques globales satisfaisantes (rendement en grains, biomasse) malgré les contraintes climatiques et édaphiques locales.
- c. L'intégration de génotypes de quinoa adaptés aux systèmes agricoles sahariens constitue une opportunité pour améliorer la diversification des cultures et renforcer la durabilité des systèmes de production en Algérie.

Les hypothèses ci-dessus s'appuient sur des études antérieures menées dans d'autres régions arides et semi-arides du monde, où le quinoa a démontré son potentiel d'adaptation à des conditions similaires. Cependant, les performances des génotypes de quinoa peuvent varier selon les conditions locales (type de sol, climat, pratiques culturales), ce qui rend nécessaire une évaluation spécifique de leurs performances dans le contexte du Sahara algérien. En outre, l'identification de variétés adaptées pourrait constituer une base solide pour la promotion de cette culture à grande échelle dans la région.

L'introduction du *Chenopodium quinoa* Willd., dans les zones sahariennes, telles que la région de Ouargla, constitue une démarche innovante dans le contexte agricole algérien. Cette étude se distingue par plusieurs aspects originaux :

- Adaptation d'une culture alternative dans un environnement extrême :

Jusqu'à présent, peu de recherches ont été menées pour évaluer le potentiel du quinoa dans des conditions sahariennes spécifiques. L'étude explore la capacité de cette plante à tolérer des contraintes environnementales majeures comme la salinité, la chaleur intense et la faible disponibilité en eau, caractéristiques des zones arides.

- Évaluation comparative de génotypes sous des conditions locales :

L'étude porte sur la caractérisation et la comparaison de cinq génotypes de quinoa dans des conditions sahariennes. Cette démarche est novatrice car elle permet de fournir des

données spécifiques sur le comportement de géotypes particuliers dans un environnement saharien, ce qui n'a pas encore été suffisamment exploré en Algérie.

- Contexte saharien spécifique :

La région de Ouargla, avec ses caractéristiques environnementales uniques (sols salins, températures extrêmes, faible teneur en matière organique), constitue un cadre inédit pour tester l'adaptabilité du quinoa. Peu d'études ont ciblé cette région, ce qui confère à cette recherche une grande originalité sur le plan géographique et agro-écologique.

Cette étude apporte des contributions significatives sur plusieurs plans :

- Identification de géotypes adaptés aux zones sahariennes :

Les résultats attendus doivent permettre de déterminer quels géotypes de quinoa sont les plus résilients face aux contraintes climatiques et édaphiques de la région de Ouargla. Ces données sont essentielles pour soutenir la promotion de variétés adaptées aux régions sahariennes d'Algérie.

- Diversification des cultures dans les zones sahariennes :

L'introduction du quinoa comme culture alternative contribuera à diversifier les systèmes agricoles sahariens. Cela répond à un besoin urgent de réduire la dépendance aux cultures traditionnelles, notamment les céréales classiques qui sont très sensibles aux effets du changement climatique et à la salinité des eaux et des sols. Les céréales traditionnelles sont souvent peu adaptées aux nouvelles conditions climatiques extrêmes.

- Contribution à la sécurité alimentaire :

Le quinoa est reconnu pour sa haute valeur nutritionnelle (teneur élevée en protéines, présence équilibrée de tous les acides aminés essentiels, et absence de gluten). La promotion de sa culture dans les zones sahariennes pourrait jouer un rôle clé dans l'amélioration de la sécurité alimentaire, en particulier dans un contexte de changement climatique et de dégradation des terres agricoles.

- Valorisation des terres marginales :

Les terres sahariennes, souvent considérées comme peu productives, pourraient être valorisées grâce à la culture du quinoa. Cela apporterait une nouvelle perspective pour l'exploitation agricole des régions arides, contribuant ainsi au développement rural de ces zones considérées comme marginales.

Cette étude apporte aussi des contributions économique et environnementale significatives sur plusieurs plans :

- Réduction de la dépendance aux importations alimentaires :

En favorisant la culture du quinoa, une plante adaptée aux conditions locales, l'Algérie pourrait réduire sa dépendance vis-à-vis des importations de céréales et améliorer son autosuffisance alimentaire.

- Utilisation rationnelle des ressources hydriques :

Le quinoa, en raison de sa faible consommation en eau et de sa capacité à tolérer des eaux salines, constitue une solution durable pour l'agriculture dans des régions où les ressources en eau douce sont limitées.

- Contribution à l'agriculture durable :

En introduisant une culture résiliente aux stress abiotiques, l'étude contribue à promouvoir des pratiques agricoles adaptées au changement climatique, tout en réduisant la pression sur les ressources naturelles.

La présente thèse est organisée en cinq chapitres qui sont structurés comme suit :

- **Chapitre I** : Une revue bibliographique qui présente l'origine, les caractéristiques de la plante et le potentiel du quinoa, ainsi que sa valeur nutritive, et les pratiques agricoles adaptées à partir des premiers essais de son introduction en Algérie
- **Chapitre II** : Une présentation générale de la région d'étude
- **Chapitre III** : Une description détaillée des matériaux et méthodes utilisés pour les expérimentations dans le cadre de la thèse
- **Chapitre IV** : Une présentation puis une analyse des résultats obtenus concernant le développement aux différents stades phénologiques et les performances agronomiques des géotypes

- **Chapitre V** : Une discussion approfondie des résultats en relation avec la littérature existante, suivie de recommandations pratiques
- **Conclusion générale et perspectives** : Une synthèse des principales contributions de l'étude et des perspectives pour les recherches futures.

En résumé, cette recherche ambitionne de fournir des données scientifiques solides pour encourager la diversification agricole et améliorer la résilience des communautés rurales face aux défis environnementaux et climatiques.

Chapitre I
Revue bibliographique

1. Description de la culture de quinoa

1.1 Origine et distribution géographique

Le quinoa est une culture indigène originaire de la région andine de l'Amérique du Sud, et plus précisément des alentours du lac Titicaca sur les hauts plateaux (Altiplano) bolivien et péruvien (Wilson, 1990 ; Mujica et al, 2001). Le quinoa aurait été domestiqué il y a 7000 ans par les peuples andins (Mujica et al, 2001), même si Galwey et al (1990) le situent davantage entre 3000 et 5000 ans avant J-C. A partir de cette date, le quinoa a été cultivé et consommé pendant des siècles par les populations paysannes indigènes de Colombie, Équateur, Pérou, Bolivie et Chili (Gandarillas, 1979).

Le quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) largement répandu géographiquement, présente des caractéristiques singulières dans sa morphologie, sa coloration et son comportement aux différentes zones agro-écologiques. La faculté d'adaptation de l'espèce est très grande puisqu'on peut la cultiver depuis le niveau de la mer au Chili, jusqu'à plus de 4000 m d'altitude sur l'Altiplano boliviano-péruvien, sous des climats allant du froid aride jusqu'au tropical humide (Figure 1).

Après la conquête espagnole au XVIème siècle, la culture et l'utilisation du quinoa ont connu un important déclin à cause de l'introduction de cultures européennes (blé, orge) pour permettre la préparation de pain, le quinoa étant exempt de gluten et il fallait d'abord éliminer ses saponines pour le consommer. De plus, les colons espagnols semblent en avoir activement découragé la culture en raison de son statut religieux dans la société Inca, qui considérait le quinoa comme une graine sacrée et préparaient avec le grain des boissons pour des cérémonies rituelles (Cusack, 1984 cité par Jacobsen et Stolen, 1993).

Le quinoa est progressivement devenu une culture mineure, principalement cultivée par les populations indigènes pour leur consommation locale dans les régions montagneuses. Malgré cela, il est resté la plante à graine la plus cultivée des hauts plateaux andins (déserts arides d'altitude) en raison de sa tolérance aux conditions climatiques extrêmes (Rea et al, 1979). C'est pour ces raisons que la principale aire d'extension de la culture du quinoa reste assez limitée aux montagnes andines et à la zone de la précordillère (0-1500m d'altitude) qui longe la côte chilienne.

Pendant la période Inca, le quinoa a toutefois occupé, après le maïs, une place prédominante parmi les plantes à graines (Hunziker, 1952 cité par Jacobsen et Stolen, 1993)

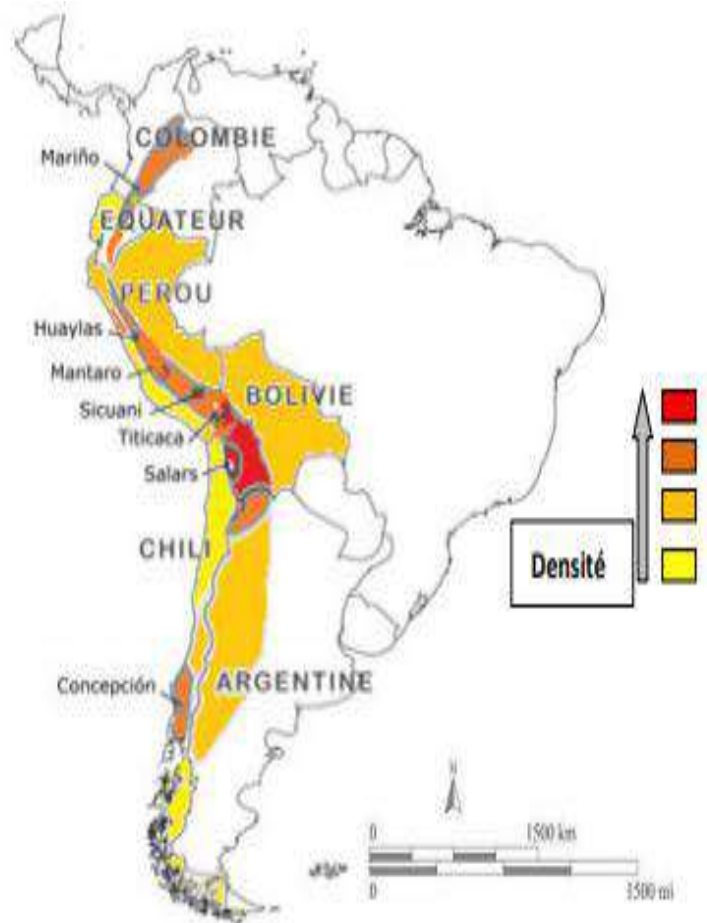


Figure 1 : Localisation géographique de la culture de quinoa en Amérique du Sud
(d'après National Research Council 1989)

1.2 Classification scientifique de l'espèce botanique

Le nom botanique complet du quinoa, *Chenopodium quinoa* Willd., inclut l'abréviation de l'auteur correspondant à Carl Ludwig von Willdenow (1765-1812). On doit à ce botaniste allemand l'étude de nombreuses plantes, dont le quinoa qu'il décrit le premier en 1797 dans son *Species plantarum* en indiquant qu'il s'agissait d'une espèce originaire d'Amérique du Sud. Cette notion fut ensuite précisée en situant son centre d'origine dans les Andes péruviennes et boliviennes, autour du Lac Titicaca.

Le quinoa appartient au genre *Chenopodium*, qui présente une large distribution mondiale et dont le nombre d'espèces n'a cessé d'évoluer au cours de la domestication des cultures (modifications morphologiques et physiologiques sous l'influence de l'environnement, sélection de nouvelles variétés, manipulations génétiques...). Si le nombre de 250 espèces a été annoncé il y a une quarantaine d'années (Giusti, 1970), on peut aujourd'hui estimer ce chiffre

à près d'un millier d'espèces. Ce genre inclut des espèces de consommation courante telles que les épinards (*Spinacia oleraceae* L.) ou la betterave (*Beta vulgaris* L.)

Le quinoa est une plante dicotylédone angiosperme de la famille des *Chenopodiaceae* selon l'ancienne classification de Cronquist (1981). Depuis 2009, une nouvelle classification phylogénétique (APG III) range le quinoa dans la famille des *Amaranthaceae* (Tableau 1). Les *Amaranthaceae* constituent une grande famille qui comprend environ 1500 espèces réparties dans une centaine de genres, poussant dans les régions tempérées et subtropicales du monde entier. Il s'agit principalement de plantes herbacées vivaces ou annuelles, plus rarement d'arbres et d'arbustes, qui sont généralement halophytes ; c'est-à dire qu'elles ont la particularité de s'adapter aux milieux salés par divers mécanismes.

Tableau 1 : Classification scientifique

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

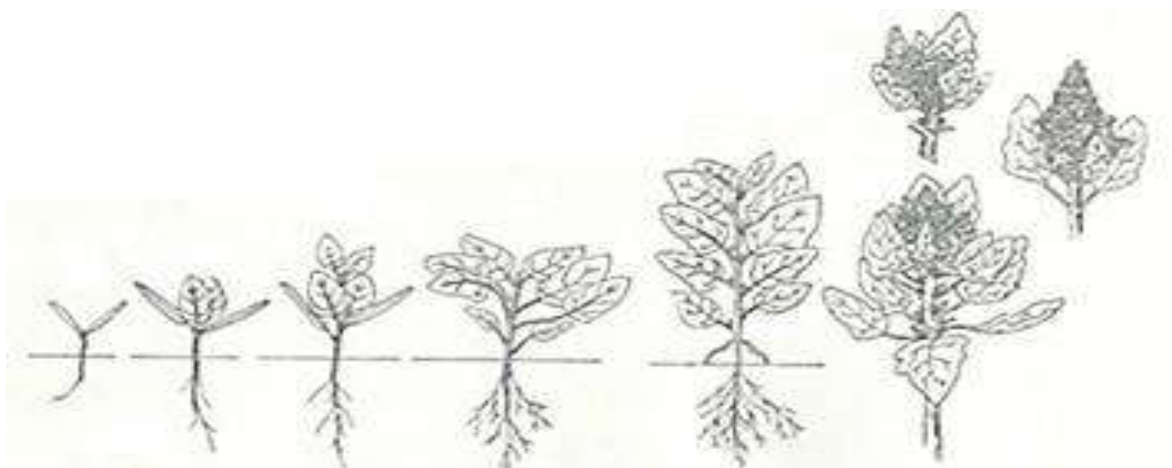


Figure 2 : Développement de la plante de quinoa (Mujica et al ; 2021)

1.3 Ecotypes

On entend par écotype l'ensemble des génotypes (incluant tous types de variétés) d'une espèce donnée qui ont développé des adaptations morphologiques et physiologiques particulières à l'écosystème dans lequel elles vivent, sans modification de leur matériel génétique, et qui se transmettent à leur descendance. Le quinoa est cultivé en Amérique du Sud (en particulier dans et autour des Andes), à des latitudes de 4°N en Colombie jusqu'à 40°S au Chili, à partir du niveau de la mer jusqu'à une altitude de 4000 mètres (Risi et Galwey, 1989). Cette diversité d'écosystèmes est associée à une variabilité génétique importante se traduisant par plus de 1 000 variétés de quinoa (Tapia, 1979 ; 2000) et 3 121 accessions (Proinpa, 2008 ; Rojas et al, 2015). Selon (Laguna, 2002 ; Tapia et Fries, 2007), environ 3000 variétés de quinoa, sauvages ou cultivées, ont pu être regroupées en cinq groupes ou écotypes selon les adaptations morphologiques et physiologiques particulières qu'elles ont pu développer pour s'adapter à leur environnement (Tableau 2). Selon la FAO (Rojas et al, 20215), on estime même à 16 422 le nombre d'accessions de quinoa présentes dans les banques de gènes au niveau mondial avec plus de 13 000 simplement entre la Bolivie et le Pérou.

Tableau 2 : Exigences de température (moy- mini) et d'humidité selon les groupes agro-écologiques du quinoa (Tapia, 1997)

Ecotype	Précipitation (mm)	Température minimale moyenne (°C)
Niveau de la mer	800 – 1500	5
Vallées	700 – 1500	3
Zone subtropicale (Yungas)	1000 – 2000	7
Salares	250 – 400	-1
Altiplano	400 – 800	0

1.3.1 Quinoa des zones situées au niveau de la mer

Le premier groupe est très différent des quatre autres, et se trouve à basse altitude et proche de la mer, dans un climat méditerranéen (300 à 500 mm de précipitations annuelles) au Centre Chili ou plus pluvieux au Sud Chili (1500 à 2000 mm de précipitations annuelles).

Il prospère au centre-sud du Chili, autour de 30°S de latitude, en particulier dans la région de Concepción et de Valdivia. Les plantes poussent dans les régions situées entre le niveau de la mer et 1500 mètres d'altitude. Les plantes de cet écotype sont bien adaptées aux

climats méditerranéens et tempérés. Elles sont plus ou moins robustes, de 1 à 1,4 mètres de hauteur, majoritairement non ramifiées, et fleurissent pendant les jours les plus longs. Elles produisent de petites graines plates, beige, peu translucides et riches en saponines

1.3.2. Quinoa des vallées arides (Junín) et des vallées humides (Cajamarca)

Il provient des vallées andines situées entre 2000 et 3500 mètres d'altitudes (vallées du Sud de la Colombie, l'Equateur, le Pérou et la Bolivie). On peut distinguer deux sous-types : le quinoa poussant dans les zones de cultures irriguées dans les vallées inter andines comme à Urubamba (Pérou) et Cochabamba (Bolivie) ; et le quinoa poussant dans des conditions pluviales comme à Huaraz, dans la vallée du Mantaro, Ayacucho et Abancay (Pérou). Les plantes sont hautes, certaines atteignant jusqu'à 3,5 mètres, sont adaptées à des températures comprises en 10 et 18°C et ne résistent pas au gel. La plupart sont ramifiées et produisent des grains de petite taille, contenant peu de saponines.

1.3.3. Quinoa des zones tropicales

Il provient des vallées inter andines de la Bolivie, dans la région des Yungas, à des altitudes comprises entre 1500 et 2000 mètres. Leur adaptation au climat subtropical leur permet de supporter les niveaux les plus élevés de précipitation et de chaleur. Les plantes sont de couleur intense et leur tige a la particularité de prendre une coloration orangée à l'état mature. Les graines sont petites, blanches ou oranges. Elles présentent une longue période de végétation (saison de croissance) de 200 jours.

1.3.4. Quinoa des « Salares » (lacs salés d'altitude)

Il provient des vastes déserts de sel du sud de l'altiplano bolivien, de la puna du nord du Chili (frontière avec la Bolivie) et du nord-est de l'Argentine (Figure3), situés à près de 3900 mètres d'altitude. Les plantes peuvent résister à des conditions extrêmes : des températures de -8°C, des sols alcalins jusqu'à un pH de 8 et une très haute salinité. Leur développement initial est rendu possible par la mise à profit de l'humidité des trous creusés au moment des semailles. La culture dans ces régions suit un protocole particulier : après la récolte, le sol reste au repos pendant quatre à huit ans. La réduction de cette période de jachère a des répercussions négatives sur la fertilité des sols et l'accumulation d'eau dans le sous-sol dans ce système hydrique

endoréique. Les graines sont grosses et présentent une forte teneur en saponines (Tapia, 1979 ; Laguna, 2002).

1.3.5 Quinoa des hauts plateaux (Altiplano central et nord)

Il provient des régions montagneuses autour du Lac Titicaca (Figure 3) où les conditions de culture sont variables. Près du lac et le long des rivières, les précipitations sont faibles et les températures favorables, ce qui est propice aux variétés Kancolla, Blanca de Julí et Tahuaco. D'autre part, les variétés Cheweca, Ccoitu, Wariponcho, Chullpi et Witulla supportent des températures plus basses et s'adaptent aux hautes plaines, situées entre 3800 et 4100 mètres. Les plantes sont de petite taille (entre 0,5 et 1,5 mètre de hauteur) avec des tiges droites et une courte période de croissance.

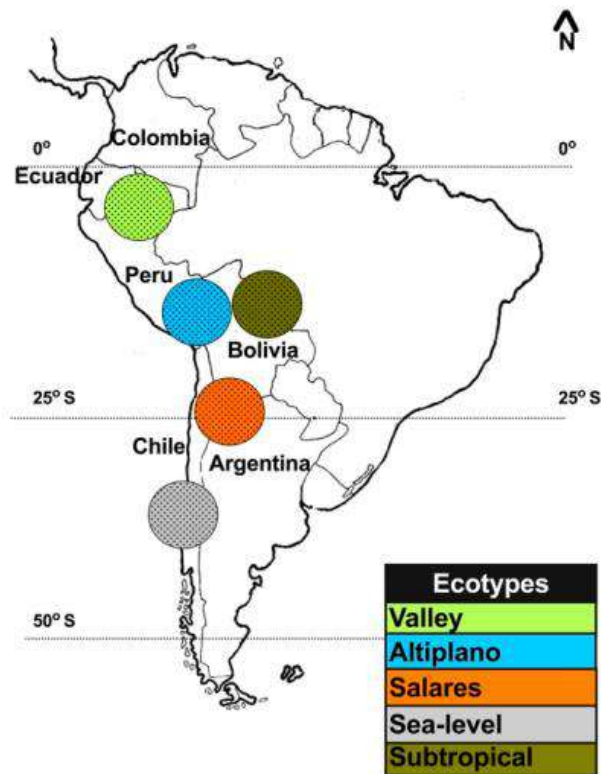


Figure 3 : Distribution géographique des écotypes de quinoa (Hinojosa et al, 2018)

2. Morphologie

2.1 Les racines

Le système racinaire du quinoa est de type pivotant, très robuste, et le pivot principal peut atteindre facilement plus de 30 cm de profondeur. À partir de cette racine, des racines secondaires et tertiaires se développent, formant des radicelles qui peuvent également se ramifier (Figure 4). Ces racines peuvent soutenir des plantes de plus de 2 m de hauteur bien que de rares cas d'affaissement des plants aient été observés sous l'effet du vent, d'une humidité

excessive ou du poids de leurs panicules (Gandarillas, 1979 ; Mujica et al, 2001). C'est grâce à ce système racinaire vigoureux, profond, bien ramifié et fibreux que le quinoa peut résister à la sécheresse en allant puiser l'eau en profondeur. La profondeur de la racine est étroitement liée à la hauteur de la plante et à l'aspect meuble du sol (notamment sableux). 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 (Pacheco et Morlon, 1978 ; Tapia et al, 1979 ; Izquierdo et al, 2001).



Figure 4 : Système racinaire du quinoa (Gandarillas, 1979)

2.2 La tige

La tige 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. Elle peut être unique ou bien présenter de nombreuses ramifications. Son diamètre varie entre 1 et 8 cm, et sa hauteur entre 50 cm et 2 m, selon les variétés et les conditions de culture comme la densité d'ensemencement ou la fertilisation (Gandarillas, 1979b ; Cáceres, 1993 ; Mujica & Jacobsen, 1999 ; Mujica et al, 2001).

La couleur de la tige est également très variable. Elle peut être uniformément verte, verte avec des aisselles colorées (surtout rouges), verte avec des stries violettes ou rouges, ou bien uniformément rouge (Gandarillas, 1979).

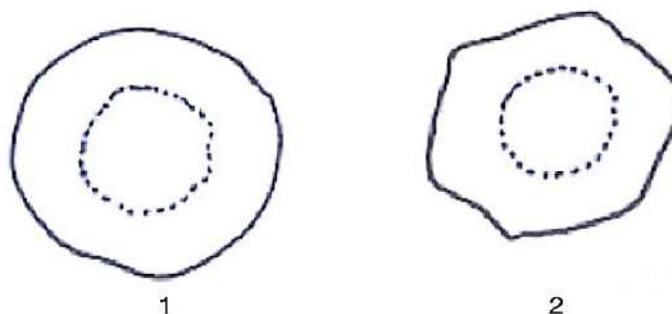


Figure 5 : Forme de la tige principale (Bioversity International et al, 2013)

(Coupe transversale ; 1. cylindrique- 2. Angulaire)

2.3 Les ramifications

La longueur des ramifications varie selon la variété et les conditions environnementales, allant de quelques centimètres jusqu'à une longueur équivalente à celle de la tige principale (Jacobsen et Stolen, 1993).

Il existe des génotypes avec des tiges de taille égale -très ramifiées- (quinoa des vallées), même à partir de la base (quinoa du niveau de la mer), tandis que d'autres présentent une tige unique (quinoa des hautes plaines). On peut trouver des plantes avec une tige principale développée et quelques tiges latérales très courtes dans les écotypes de l'Altiplano, Il existe également des génotypes intermédiaires (Mujica et al, 2001) (Figure 6).

La ramification des plants est indésirable pour une production intensive et mécanisée des graines de quinoa; c'est pourquoi dans le cadre d'une culture à grande échelle, l'ensemencement est effectué avec une densité ne laissant aucune opportunité aux plants de se ramifier (Jacobsen et Stolen, 1993). Ainsi, le développement de ramification de la plante peut être partiellement modifié par la densité de semis de la culture.

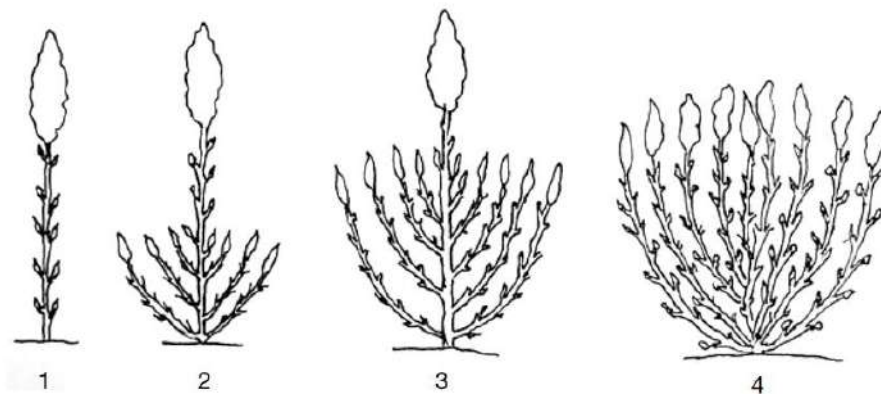


Figure 6 : Types des ramifications du quinoa (Bioversity International et al, 2013)

(1. Simple, 2. Ramification jusqu'au tiers inférieur, 3. Ramification jusqu'au deuxième tiers, 4. Ramification avec panicule non définie).

2.4 Les feuilles

Les feuilles sont alternes de longueur variable au sein de la même plante. Celles de la tige principale sont plus longues que celles des ramifications. Les feuilles inférieures sont grandes, jusqu'à 15×12 cm ; tandis que les feuilles supérieures sont petites, d'environ 10×2 mm, en forme rhomboïdales (en forme de losange), triangulaires ou lancéolées, un peu épais, charnu et tendre (Mujica et al, 2001).

La couleur des feuilles varie en fonction des génotypes, elles sont généralement vertes lorsqu'elles sont jeunes puis elles virent au jaune, rouge ou violet. Ces couleurs sont le résultat de la présence de pigments végétaux appelés bétalaïnes qui sont de deux types : bétacyanines (rouge-violet) et bétaxanthines (jaune) (Gallardo et al, 1996).

Le nombre de dents qui bordent les feuilles varie de 0 à 20 selon les différents écotypes (Gandarillas, 1968b) est une caractéristique variétale, les feuilles des quinoas de Bolivie et du sud du Pérou comptant peu de dents (Tapia et al, 1979) (Figure 7et 8).

Les feuilles présentent des adaptations morphologiques variées qui les aident à résister à la sécheresse pendant la croissance, parmi lesquelles une cuticule cireuse, des stomates protégés par un épiderme épaissi et des papilles sur les deux faces (Jacobsen et Stolen, 1993). Ainsi que l'endroit et l'envers des jeunes feuilles sont couvertes de vésicules épidermiques salines d'oxalate de calcium, de forme sphérique qui pourraient jouer un rôle important dans les relations hydriques de la plante, permettant son adaptation à la sécheresse (Dizès et Bonifacio 1992 ; Gandarillas, 1982, Mujica et al, 2001).

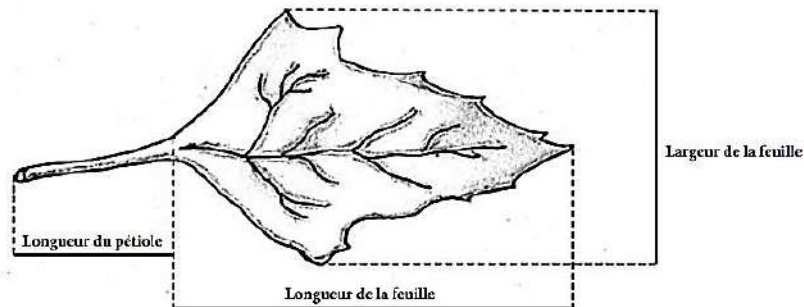
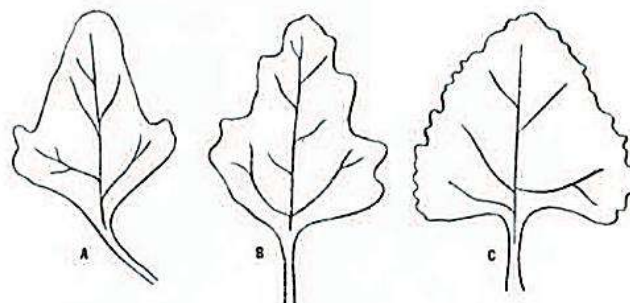


Figure 7 : Dimension de la feuille (Bioversity International et al, 2013)



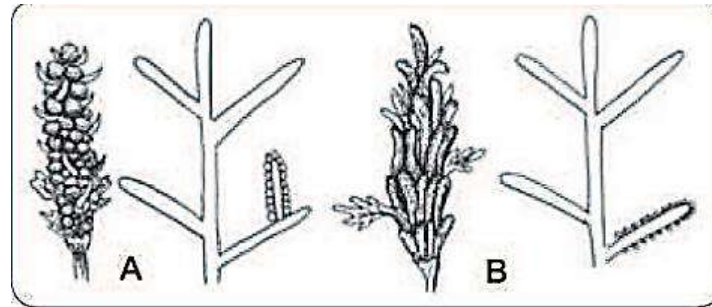
A) race du sud du Pérou et de la Bolivie avec peu de dents ; B) race du centre du Pérou avec 3 à 12 dents ; C) race du nord du Pérou et de l'Equateur avec plus de 12 dents.

Figure 8 : Variation du nombre de dents dans les feuilles de quinoa (Gandarillas, 1979)

2.5 Inflorescences

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

Il a été décrit deux types d'inflorescences chez le quinoa : glomérulaire et amaranthiforme (Figure 9).



(A) Glomérulaire ; B) amaranthiforme)

Figure 9 : Les formes d'inflorescences du quinoa (Tapia et Fries, 2007)

Chez le type glomérulaire, les glomérules (courtes ramifications portant un groupe de fleurs) sont insérés sur les axes tertiaires prenant naissance à partir des axes secondaires, tandis que chez le type amaranthiforme, ils sont directement insérés sur des axes secondaires (Bertero et al, 1996).

Selon Izquierdo et al, (2001) et Bioversity International et al, (2013) le quinoa présente trois formes d'inflorescences :

- Glomériforme (présence de glomérules dans les axes glomérulaires de forme globuleuse).
- Intermédiaire (présence de deux formes).

Amarantiforme (présence de glomérules directement dans l'axe secondaire de forme (allongée) ;

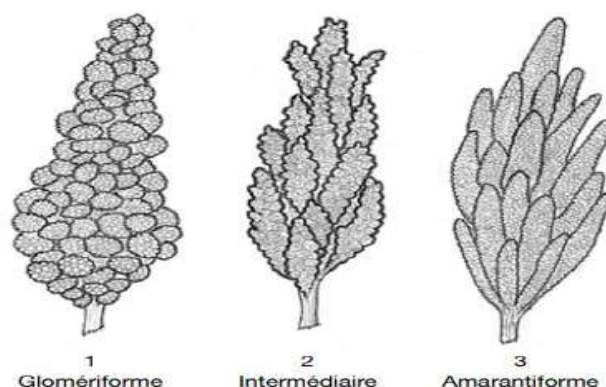
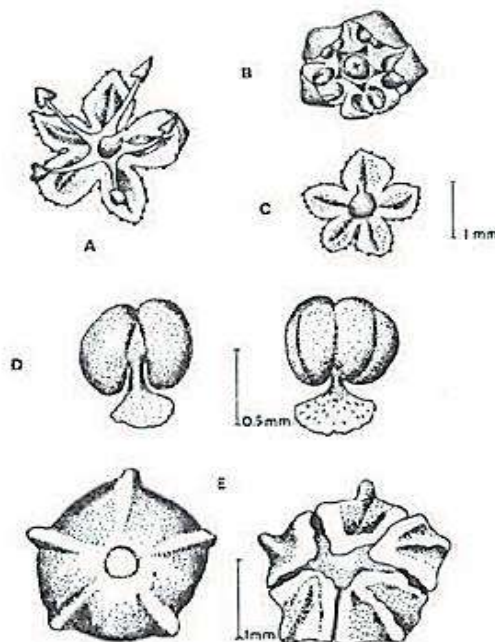


Figure 10 : Inflorescence amaranthiforme, intermédiaire et glomérulaire (Bioversity International et al, 2013)

La longueur de la panicule varie selon la variété, l'environnement et les conditions de fertilité du sol. 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. On peut même trouver de grandes panicules qui produisent jusqu'à 500 grammes de graines par inflorescence (Mujica et al, 2001).

2.6 Les fleurs

Les fleurs de quinoa se caractérisent par la présence de fleurs femelles unisexuées localisées à l'extrémité distale d'un groupe, et de fleurs hermaphrodites localisées à l'extrémité proximale (Hunziker, 1943 ; Valencia-Chamorro, 2003 ; Tapia et al, 1979 ; Izquierdo et al. 2001) (Figure 11).



A) Fleur hermaphrodite en période d'anthèse ; B) Fleur hermaphrodite avant l'anthèse ; C) Fleur femelle ; D) Etamine avant la déhiscence, vue interne et externe, respectivement ; E) Fruit recouvert par le périgone, vue ventrale et dorsale, respectivement.

Figure 11 : Fleurs hermaphrodites et femelles du quinoa (Gandarillas, 1979)

La fleur hermaphrodite est constituée d'un périgone sépaloïdes (cinq sépales), d'un gynécée (ou pistil) avec un ovaire ellipsoïdal et deux ou trois stigmates entourés par l'androcée, lui-même composé de cinq étamines recourbées et courtes. La fleur femelle se compose seulement d'un périgone et d'un gynécée. Les fleurs sont apétales (incomplètes) et très petites variant entre 1 mm et 5 mm (Gandarillas, 1979). En général le quinoa est une espèce autogame, avec environ 10-30% de pollinisation croisée (Rea, 1969). Cependant, dans quelques variétés

l'allogamie atteint exceptionnellement jusqu'à 80%, ce qui est expliqué par la rareté des fleurs pistillaires (Izquierdo et al, 2001).

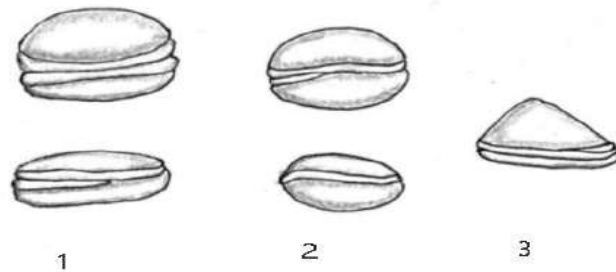
2.7 Les fruits et les graines

Le fruit est un akène comprenant plusieurs couches, à savoir de l'extérieur vers l'intérieur : périgone, péricarpe et épisperme (Risi et Galwey, 1984 ; Prego et al, 1998). 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. Dans la région ventrale de l'akène, on observe une cicatrice, le hile, qui correspond à l'insertion du fruit dans le réceptacle floral (Gandarillas, 1979 ; Mujica et al, 2001). Le péricarpe du fruit adhère à la graine et est éliminé par décorticage abrasif avant la consommation, il contient de la saponine en plus ou moins en grande quantité. Les différentes couleurs du périgone, du péricarpe et de l'épisperme (Tableau 3) sont la raison pour laquelle l'inflorescence du quinoa présente autant de couleurs variées (Gandarillas, 1979). Le périsperme est le principal tissu de stockage des graines de quinoa et représente pratiquement 60% de la superficie de la graine (Mujica et al, 2001). Les combinaisons des différentes couleurs du périgone, du péricarpe et de l'épisperme (Tableau 3) sont la raison pour laquelle l'inflorescence du quinoa présente autant de couleurs variées (Gandarillas, 1979).

Tableau 3 : Colorations dans le fruit du quinoa (Bioversity International et al, 2013)

Périgone	Péricarpe	Episperme
Vert	Crème	Transparent
Blanc	Jaune	Blanc
Crème	Jaune doré	Crème
Jaune	Rose	Café clair
Jaune doré	Rouge	Café
Rose	Café clair	Café foncé
Rouge	Café	Café rougeâtre
Orange	Café foncé	Noir
Café clair	Café verdâtre	Autre
Café	Pourpre	
Café foncé	Autre	
Café rougeâtre		
Pourpre		
Gris		
Noir		
Autre		

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



(1. Cylindrique, 2. Ellipsoïdale, 3. Conique)

Figure 12 : Forme du grain (Bioversity International et al, 2013)

3. Physiologie du quinoa

3.1 Sensibilité à la sécheresse

Le quinoa est une plante capable de croître dans les régions où la pluviométrie annuelle est de l'ordre de 200 à 400 mm –quinoa de Salares- (Tapia, 1997 ; Valencia-Chamorro, 2003), et certains écotypes ont même montré qu'ils pouvaient atteindre la maturité dans des conditions d'irrigation équivalente à seulement 50 mm de précipitation par saison, ce qui est une irrigation extrêmement faible pour toutes les espèces de cultures (Martínez et al, 2009). Une fois le semis installé, les phases critiques où un stress hydrique a le plus d'effet sur le rendement sont la floraison et le remplissage des grains (Geerts et al. 2006 ; 2008). Les travaux de Bosque et al (2003) et Geerts et al (2006 ; 2008) le confirment, et montrent même qu'un stress modéré pendant les phases initiales de croissance aura au contraire pour effet une meilleure résistance du quinoa dans la suite du cycle.

Le quinoa tolère la sécheresse principalement grâce à l'élasticité de ses tissus, à son faible potentiel osmotique et au maintien de sa turgescence. Ainsi, il peut y faire face grâce

- i- à son système racinaire très étalé en surface et qui peut être profond quand le sol le permet ;
- ii- à une réduction de sa surface foliaire par la chute des feuilles, à des glandes vésiculaires spéciales
- iii- à des cellules petites avec une paroi épaisse qui maintiennent leur turgescence et enfin grâce à un comportement stomatique dynamique (Jensen et al, 2000).

Mujica et al (2001) ont résumé ces mécanismes d'ordre morphologique, physiologique, anatomique, phénologique ou biochimique tels que repris dans le Tableau 4 ci-après.

Tableau 4 : Mécanismes de résistance du quinoa à la sécheresse

(D'après Mujica et al, 2001).

Types de mécanismes	Caractéristiques
Morphologiques	Réduction de taille des plantes entières ou des feuilles, Réduction de la surface foliaire par perte de feuilles, Plasticité du développement et de la croissance, Repli des feuilles sur la panicule
Physiologiques	Plus grande résistance stomatique, Récupération rapide des capacités photosynthétiques après une période de sécheresse, faible taux de transpiration, concentration sur les organes jeunes de cristaux d'oxalate de calcium réfléchissant la radiation solaire et favorisant la rétention d'humidité atmosphérique, plus grande vitesse d'absorption d'eau, plus grande tolérance au sel
Anatomiques	Plus grand développement racinaire (en densité et profondeur). Réduction du nombre et de la taille des stomates
Phénologiques	Développement racinaire plus rapide dans les premières étapes de croissance, Asynchronisme dans la phase de floraison, Raccourcissement de la phase de floraison, Développement phénologique plus rapide, Résistance ontogénique (endurcissement par les stress antérieurs)
Biochimiques	Présence d'oxalate de calcium dans les feuilles, tiges et panicule Thermostabilité des cellules, Plus grande production d'acide abscissique (ABA), Translocation des ions K et Ca des cellules stomatiques durant les périodes de sécheresse

3.2 Sensibilité au froid

La température moyenne adéquate pour la culture de quinoa se situe autour de 15- 20 °C. Il est admis qu'avec des températures moyennes de 10°C la culture se développe parfaitement, l'effet du gel sur la plante est différent selon son intensité et sa durée, mais aussi selon les phases phénologiques.

Pour les températures basses, les phases de préfloraison et floraison sont sensibles et ne peuvent résister que jusqu'à -3°C (Canahua & Rea, 1979). Bois et al (2006) ont constaté la survie de certaines variétés jusqu'à -4°C, Vacher et al. (1998) ont rapporté que certaines variétés résistent jusqu'au -14°C au stade plantule. En outre d'autres toléraient jusqu'à -16 à -18°C durant les premiers stades de croissance d'après Catacora et Canahua (1992). Le quinoa a mis en œuvre divers moyens pour survivre au gel (Tableau 5), le principal consistant à éviter la formation de glace par surfusion modérée. En fait, le quinoa présente une teneur élevée en sucres solubles,

ce qui peut provoquer une diminution du point de congélation, et donc contribue à abaisser la température létale du tissu des feuilles (Jacobsen et al, 2007).

Tableau 5 : Mécanismes de résistance du quinoa au froid (d'après Mujica et al, 2001).

TYPE DES MECANISMES	CARACTERISTIQUES
Morphologiques	Chute de feuilles Réduction de la taille des feuilles Réduction de la taille de la plante
Physiologiques	Mouvements des feuilles et de la tige. Osmo-régulation de la formation de glace dans l'apoplaste et résistance au sous refroidissement.
Anatomiques	Stomates moins nombreuses et plus grandes
Phenologiques	Phases phénologiques plus tolérantes au froid, prolongation ou raccourcissement des phases phénologiques
Biochimiques	Accumulation de métabolites (sucres solubles, proline et protéines)

3.3 Sensibilité à la salinité

La zone de plus grande production de quinoa dans le monde correspond à la région des salars de l'Altiplano sud de Bolivie, où les sols présentent une grande concentration de sels, principalement de chlorure de sodium. Les variétés du groupe "Salar" peuvent résister et produire des grains sans difficulté à des niveaux de salinité compris entre 8 et 15 mS/cm sans diminution de leur biomasse. Jacobsen et al (2000) ont trouvé chez une de ces variétés un maintien du rendement jusqu'à une salinité de 25 mS/cm, avec une division du rendement par 2 lorsque la salinité de l'eau dépasse les 30 mS/cm. D'après Mujica et al (2001), la germination est possible à 52 mS/cm, mais retardée de 25 jours. On considère le quinoa comme une halophyte facultatif, car il peut vivre autant en milieu salé comme en milieu d'eau douce (Bosque et al, 2003). Le quinoa pourrait être utilisé pour nettoyer des sols contaminés par le sel (Jacobsen et al, 2000b), il est ainsi capable d'accumuler des ions salins dans ses tissus pour ajuster le potentiel hydrique foliaire. Cela lui permet de maintenir la turgescence cellulaire et de limiter sa transpiration, dans des conditions salines (Jacobsen et al, 2001).

4. Etude agronomique

4.1 Phénologie du quinoa

Différents auteurs ont proposé des échelles pour décrire le développement phénologique de quinoa (Tableau 6). Selon Tapia et al (1979), le cycle de croissance du quinoa peut être différencié en cinq sous-périodes, Espindola (1986), Mujica et Canahua (1989) considèrent 12 phases phénologiques et Espindola (1992) distingue 10 étapes morpho-anatomiques.

Tableau 6 : phénologie de quinoa (selon Tapia et al (1979), Espindola (1986) ; (1992) et Mujica et Canahua (1989)

Tapia et al. (1979)	Espindola (1986)	Mujica et Canahua (1989)	Espindola (1992)
1) du semis à l'émergence,	1) émergence,	1) Levée,	1) étape d'émergence.
2) de l'émergence à l'apparition de la première paire de feuilles.	2) deux feuilles véritables,	2) deux feuilles vraies,	2) étape cotylédonaire.
3) de la première paire de feuilles à l'apparition des panicules.	3) quatre feuilles véritables,	3) Quatre feuilles vraies,	3) étape des deux feuilles de base.
4) des panicules à la floraison.	4) six vraies feuilles,	4) Six feuilles vraies,	4) étape de 5 feuilles alternes (différenciation paniculaire).
5) de la floraison à la maturation.	5) ramification,	5) Ramification,	5) étape de 13 feuilles alternes (pré-émergence paniculaire).
	6) début de formation de la panicule,	6) Début de formation de la panicule,	6) étape d'émergence de la panicule.
	7) formation de la panicule,	7) panicule,	7) étape de floraison.
	8) début de la floraison,	8) Début de floraison,	8) étape de grain laiteux.
	9) floraison ou anthèse,	9) floraison,	9) étape de grain pâteux.
	10) grain laiteux,	10) Grain laiteux,	10) étape de grain dur (maturité physiologique).
	11) grain pâteux	11) Grain pâteux,	
	12) maturité physiologique	12) maturité physiologique.	

Plusieurs auteurs ont constaté des différences significatives entre les phases phénologiques, les durées totales de cycle dépendent de la lignée, l'année de culture, du type de quinoa (les quinoas fourragers sont plus précoces que les quinoas à grains) et de la localisation (les cycles sont globalement plus précoces au Danemark qu'au Pérou) (Jacobsen et Stølen, 1993). La durée entre la phase de deux feuilles vraies jusqu'à la formation de la panicule est estimée entre 41 et 89 jours ; celle de la formation de la panicule à l'anthèse variant de 7 à 53

jours, et la période de l'anthèse à la maturité physiologique entre 65 et 137 jours (Risi & Galwey, 1989) (Figure 13)

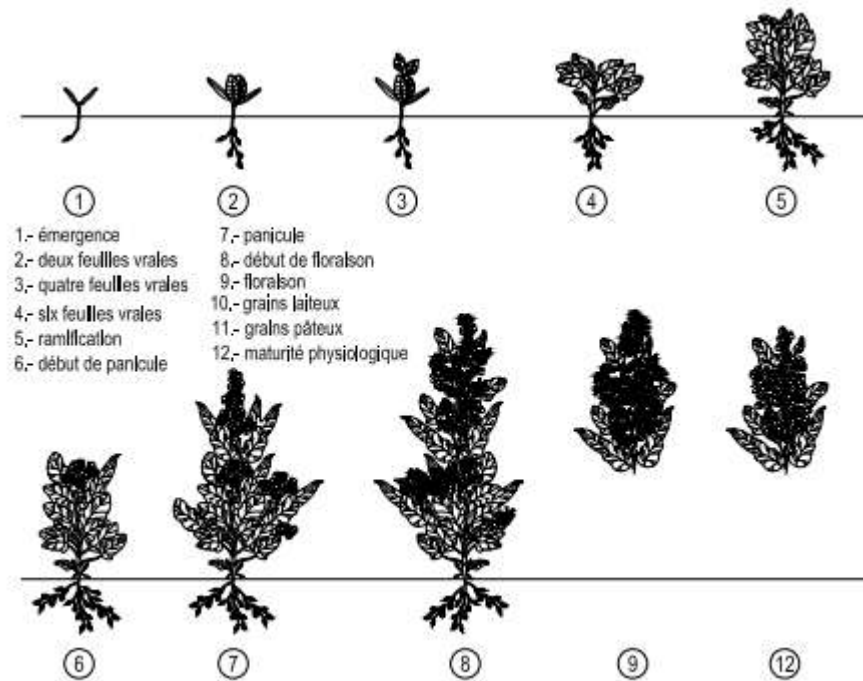


Figure 13 : Phases phénologiques du quinoa selon l'échelle de Mujica et Canahua (1989) (Bioversity International et al, 2013)

4.2. Techniques culturales

Le système de culture de quinoa a été mécanisé uniquement pour l'étape de préparation du sol, et parfois semis, dans l'Altiplano Nord et Centre, mais reste manuelle dans le Sud (Salars) (Felix, 2004).

4.2.1 Travail du sol

Dans l'Altiplano nord ou central, le quinoa est une culture de rotation qui ne nécessite pas de préparation spécifique du terrain pour le semis car, suite à la récolte de la pomme de terre, le sol est suffisamment meuble. Dans l'Altiplano Sud, le quinoa est actuellement présent quasi exclusivement en monoculture car c'est la seule espèce cultivée capable de résister aux conditions de désert d'altitude. Traditionnellement, sa culture se fait sur les versants des montagnes, moins soumis au gel que les plaines qui accumulent les masses d'air froid ; elle est alors manuelle, la présence de pierres et la pente des versants empêchant le passage du tracteur (Felix, 2004). Dans l'Altiplano sud, les cycles de culture de quinoa alternent avec des périodes de jachère plus ou moins longues : de plus de dix ans autrefois. La préparation de la première

mise en culture se fait au moyen de charrues à versoir et à disques ou, dans les endroits accidentés où cela reste possible, à l'aide de charrues jointes ou même de simples houes. Le nivellement peut être réalisé au moyen de barres de fer ou de grosses planches. Étant donné la petite taille des graines et les fortes hétérogénéités d'humidité et de compaction du lit de semence, cette opération de nivellement est importante pour la réussite de la levée.

4.2.2 Semis

Les semis ont habituellement lieu durant les mois d'août et de septembre sur les hauts plateaux andins, mais peuvent être retardés jusqu'à début décembre avec certaines variétés de cycle très court (90 jours). La manière de semer varie aussi selon les régions de production, se faisant par poquets (*hoyos*) dans les régions méridionales arides, et sur des sillons (*surcos*) ou à la volée dans les régions mieux arrosées de l'Altiplano central et nord et les vallées inter-andines.

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, la densité de semis est de 10 à 15 kg ha⁻¹ de grains avec 100 à 250 plantes par m² à profondeur aux alentours de 3 cm (Felix, 2004).

4.2.3 Fertilisation

La fertilisation organique ou minérale des parcelles de quinoa est peu pratiquée. Si le quinoa suit un cycle de pomme de terre, elle se satisfait de l'engrais organique (fumier) apportée au moment du semis de la pomme de terre (la culture précédente) (Auza, 2003). Mais elle peut également parfois être accompagnée de fertilisation chimique (« 1/2 ou 1 sac » d'urée par hectare). Si le quinoa suit une jachère, alors aucune fertilisation n'est apportée (Félix, 2004).

En général, on considère que l'apport d'azote devrait être de 125U/ha.

Le quinoa tolère une large gamme de pH du sol, depuis les 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).

4.2.4 Récolte

La récolte se fait de mars à mai lorsque les plantes ont atteint la maturité physiologique et que le grain est très sec, le travail peut s'étaler sur deux mois car la maturité des plantes au sein du terroir n'est pas uniforme, le quinoa est arraché jusqu'à la racine ou coupées, et laissé à sécher sur les parcelles dans le champ pendant 1 ou 2 mois. Les rendements sont très variables

et globalement faibles en culture traditionnelle, ils sont environ de 400 (Altiplano Sud en Bolivie) à 1200 kg ha⁻¹ (Altiplano Nord au Pérou). Selon Laguna (2002) le rendement sur l'Altiplano elle n'est en moyenne que de 0,6 t. ha⁻¹, et le poids de 1 000 grains moyen est de 2,30 g. La culture (labour, semis, récolte) a été mécanisée dans l'Altiplano Nord et dans l'Altiplano Centre, mais elle reste encore en grande partie manuelle dans le Sud (Felix, 2004).

5 Principaux ennemis du quinoa

Le Mildiou est la maladie la plus courante du quinoa, favorisée par des conditions humides et fraîches. Elle provoque des taches jaunes sur les feuilles et peut entraîner une défoliation complète, une maturation prématurée et une perte de rendement de 99 %. Même chez le cultivar le plus résistant, le rendement a été réduit de 33 %, ce qui indique le pouvoir destructeur de cette maladie (Danielsen et al 1999 ; 2003).

Par contre plusieurs insectes nuisibles peuvent affecter les cultures de quinoa, influençant ainsi la qualité et le rendement des grains. Les pucerons, en particulier (*Myzus persicae*) et (*Aphis fabae*), se nourrissent de la sève végétale, ce qui provoque un affaiblissement global et une déformation des feuilles. Ils sont aussi porteurs de maladies virales. Rodríguez et al (2019) ont rapporté une prévalence élevée de pucerons dans les plantations de quinoa en Bolivie. Lépidoptère de l'automne (*Spodoptera frugiperda*), ce papillon lépidoptère dévore les feuilles et peut entraîner des dommages considérables. En Amérique du Sud et en Afrique, où la culture du quinoa débute, le problème est particulièrement prononcé. Zurita et al (2021) ont constaté d'importants dégâts en Équateur.

6 . Valeur alimentaire

La FAO a choisi le quinoa comme une culture destinée à garantir la sécurité alimentaire, grâce à son intérêt nutritif, qui réside dans sa composition équilibrée et complète en aminoacides essentiels (la lysine fait généralement défaut dans les autres céréales), comparable à celle du lait et supérieure à celle du blé et d'autres céréales (Chauhan et al, 1992 ; Koziol, 1992 ; Ng et al, 2007) (Tableau 8). Elle se caractérise ainsi par une teneur élevée en protéines : 11 à 22%, contre 7 à 13% chez la plupart des autres céréales (blé, riz, maïs, orge, etc.) (Cardazo et Tapia, 1979 ; Koziol, 1992 ; Schlick et Budenheim, 1996 ; Ayala et al, 2001 ; Wright et al, 2002 ; Bhargava et al, 2006) (Tableau 7).

Tableau 7 : Composition des grains de quinoa et de blé (g/100g de matière sèche)

(* Tapia et al. 2000 ** Feillet 2000)

	Quinoa *	Blé *, **
Protéines	11,0 – 21,3	12,5
Lipides	5,3 – 8,4	2 – 3
Glucides	53,5 – 74,3	67 – 71
Fibres	2,1 – 4,9	2- 4
Cendres	3,0 – 3,6	1,5 - 2,5
Humidité	9,4 – 13,4	14,5

En outre, son contenu en minéraux très supérieur à celui des céréales (Tableau 8), en particulier en phosphore, magnésium, potassium et fer. Enfin, des études récentes indiquent que le quinoa est une excellente source de vitamines, d'antioxydants et d'acides gras en particulier les acides gras polyinsaturés (omega 3 et 6) qui peuvent représenter jusqu'à 75% des lipides du quinoa (Dini et al, 2004 ; Ng et al, 2007).

Tableau 8 : Les teneurs en acides aminés du quinoa par rapport aux normes de la FAO et d'autres aliments (g/100g de protéines). (FAO, 2016)

	FAO	QUINOA	MAIS	RIZ	BLE
Isoleucine (g)	3,0	4,9	4,0	4,1	4,2
Leucine (g)	6,1	6,6	12,5	8,2	6,8
Lysine (g)	4,8	6,0	2,9	3,8	2.6
Méthionine (g)	2,3	5,3	4,0	3,6	3,7
Phénylalanine (g)	4,1	6,9	8,6	10,5	8,2
Thréonine (g)	2,5	3,7	3,8	3,8	2,8
Tryptophane (g)	0,66	0,9	0,7	1,1	1,2
Valine (g)	4,0	4,5	5,0	6,1	4,4

7. Quinoa dans le monde

7.1 Expansion de la culture de quinoa au niveau mondial

L'expansion spatio-temporelle de quinoa à travers le monde a connu plusieurs étapes au fil de temps ; 1- **avant les années 1900** : le quinoa était limité dans les pays Andins : la Colombie, l'Équateur, le Pérou, la Bolivie, l'Argentine et le Chili. Il était considéré comme culture vivrière locale, et comme un aliment de base pour les populations Andes (Tapia et al, 1979 ; Maughan et al, 2007 ; Alandia et al, 2020), 2- **entre 1901 et 1969** : à titre d'expérimentation le quinoa a été importé en Afrique, la première expérience connue en dehors des Andes a eu lieu en 1935 au Kenya, et d'autres essais sur la réponse de quinoa aux carences

en nutriments et la tolérance aux stress abiotiques (salinité et température) entre 1950 et 1968 (Bazile et Baudron, 2014 ; Bazile et al, 2016a). **3- entre 1970 et 1989** : le quinoa a été introduit aux continents du nord, Amérique du nord aux Colorado, Canada en 1980 (Alandia et al, 2011 ; Bazile et al, 2016a), en Europe, en Angleterre, Danemark et les Pays-Bas (Galwey, 1993 ; Jacobsen, 2003 ; Bazile et al, 2016a), en Asie, Inde et en Chine (Bhargava et Ohri, 2014 ; Bazile et al, 2016 ; Alandia et al, 2020). Au cours de cette période, le quinoa a également été testé au Brésil et à Cuba (Bazile et al, 2015 ; 2016). A la fin des années 1980 le quinoa a été présent dans 11 pays en dehors des Andes. **4- entre 1990 et 2012** : dans cette période le quinoa s'est répandu dans 30 nouveaux pays, propulsé par le projet « Test américain et européen du quinoa » entre 1993 et 1996 (Jacobsen, 2003a ; Bazile et Baudron, 2014) qui a donné la naissance à la première variété (Atlas) et cultivars (Carmen) en Europe (Jacobsen, 2003a ; Alandia et al, 2020). En 2012, le quinoa est apparu dans quelques pays de la région méditerranéenne (Bazile et Baudron, 2014 ; Bazile et al, 2016a). **5- entre 2013 et 2018** : après la déclaration de l'année internationale du quinoa en 2013, celle-ci a été testée dans 76 pays au monde, 31 pays en Afrique, 24 pays en Asie et 15 pays en Europe (Alandia et al, 2020). De même un projet régional de la FAO intitulé : « Assistance technique pour le renforcement du système alimentaire associé au Quinoa », a été lancé en 2013-2015, facilitant la signature d'accords de transfert de matériel génétique entre pays avec le Pérou pour la distribution des accessions de quinoa parmi les institutions nationales de recherche de huit pays, d'Afrique du Nord et du Proche-Orient « Algérie, Egypte, Iraq, Iran, Liban, Mauritanie, Soudan et Yémen » (Bazile et al, 2016), pour évaluer ces génotypes en conditions semi-arides et arides (Figure 14).

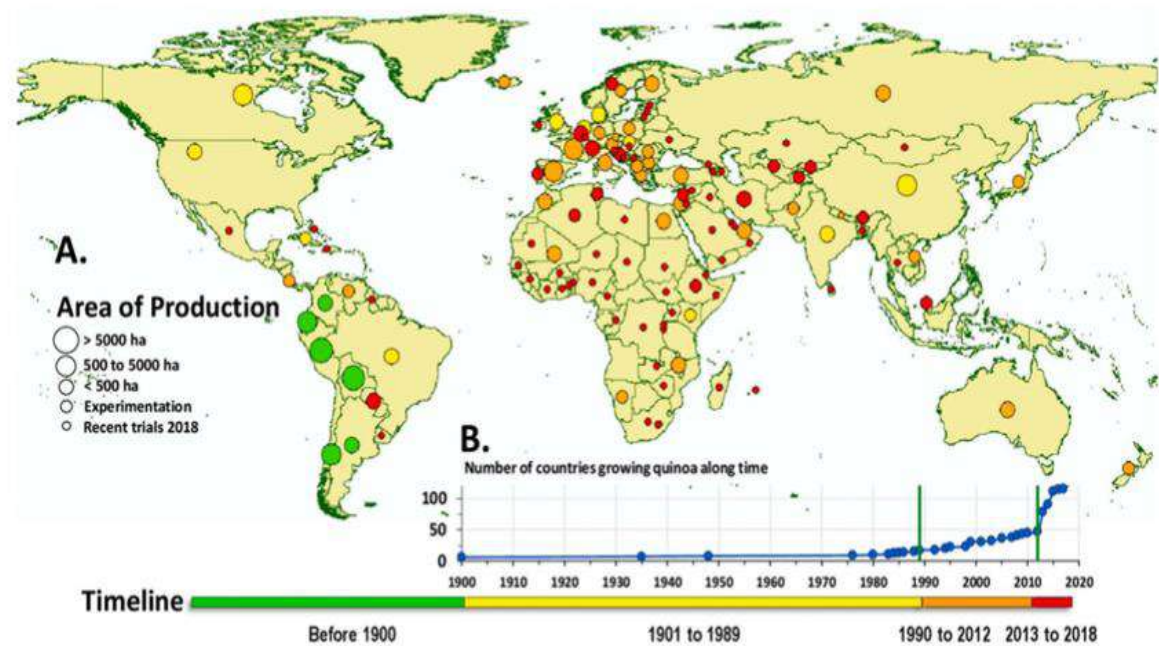


Figure 14 : Répartition mondiale du quinoa dans le temps : (A) zones de production et d'expérimentation du quinoa et (B) nombre de pays cultivant le quinoa (d'après Alandia et al, 2020).

7.2 Le quinoa en Algérie

L'Algérie l'un des pays qui a bénéficié de l'expansion de quinoa et de l'expertise technique de la FAO pour évaluer le comportement de cette culture sur un projet TCP Régional en 2014/2015. Sur la base de cette approche, huit (08) sites ont été choisis au niveau des différentes régions agro-écologiques en Algérie, pour l'implémentation des premiers essais. Il s'agit de Baïnem (Alger), Setif, Tiaret, Relizane, Guelma, Biskra, El Oued et Adrar (figure15), dans un but d'évaluer 16 génotypes de quinoa (Q21, Q12, Q29, Q18, Q26, Q22, Q27, Giza1, Giza2, *Sajama*, *Santamaria*, *Amarilla Marangani*, *Amarille Sacaca*, *Blanca de Junin*, *Kancolla* et *Salcedo Inea*) afin de déterminer les caractéristiques phénologiques et les composantes du rendement.

Des essais ont été réalisés en automne 2014 sur 06 sites, à savoir : Baïnem (Alger), Setif, Tiaret, Biskra, El Oued et Adrar, puis des essais au printemps 2015 ont été réalisés sur 02 sites : Guelma et Relizane. Le rendement de ces essais a varié entre 0 et 26,2 qx/ha.

Malgré ces premiers essais effectués dans plusieurs stations expérimentales d'Algérie, la culture du quinoa est restée très rudimentaire, et elle n'a pas été généralisée ni reconnue dans tout le territoire Algérien (Maamri et al, 2022). Actuellement, des recherches sont en cours sur la caractérisation morphologique de certaines variétés de quinoa, ainsi que l'effet du stress salin sur les performances physiologiques de ces plantes. L'objectif primordial de l'introduction de

quinoa en Algérie c'est pour exploiter les endroits et les terres marginales touchées par la salinité, sécheresse et les hautes températures ainsi que l'appui de l'agrosystème saharien par une nouvelle culture qui peut supporter et faire face aux conditions désertiques.

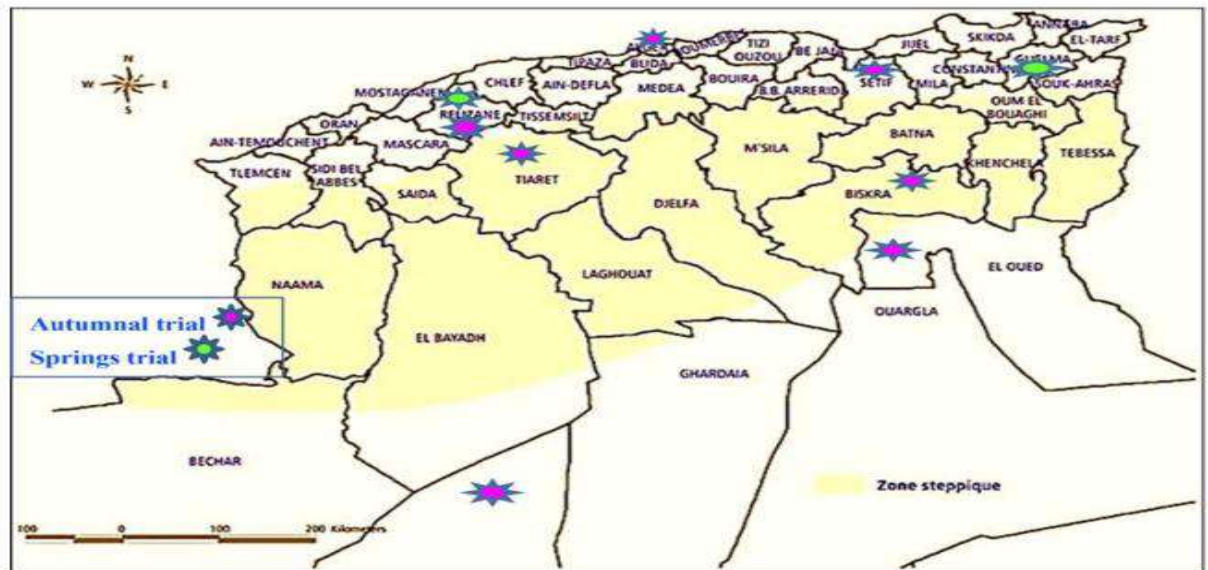


Figure 15 : Localisation des premiers sites des essais de cultures de quinoa en Algérie, *adapté par ITDAS (Institut Technique de Développement de l'Agronomie Saharienne)*

8. Superficie, production, les principaux pays producteurs

La culture du quinoa est principalement concentrée en Amérique du Sud, avec la Bolivie et le Pérou en tête. En 2023, la Bolivie possédait la plus grande superficie récoltée de quinoa, couvrant 126 287 hectares, suivie par le Pérou avec 39 084 hectares (the world ranking, 2022). L'Équateur et le Bhoutan cultivent également du quinoa, mais sur des superficies beaucoup plus modestes, respectivement 458 hectares et 10 hectares.

Les principaux pays producteurs de quinoa au monde sont le Pérou et la Bolivie avec plus de 92% de la production mondiale soit plus de 70 000 tonnes en 2010 (FAO, 2015).

En termes de production, le Pérou est le principal producteur mondial, avec une récolte de 70 479,07 tonnes en 2023. La Bolivie suit avec 41 380,22 tonnes (the world ranking, 2023). L'Équateur et le Bhoutan produisent des quantités bien moindres, respectivement 378,4 tonnes et 12,87 tonnes. Les principaux producteurs de quinoa en dehors des Andes sont États-Unis, Canada et Chili représente plus de la moitié de la production signalée en dehors du Pérou et de Bolivie (FAOSTAT, 2013).

Chapitre II
Présentation générale
de la région d'étude

1. Situation géographique

La région de Ouargla est située au fond d'une large cuvette de la vallée de l'Oued M'ya au Sud Est de l'Algérie, à une distance de 800 km de la capitale Alger. La ville de Ouargla, chef-lieu de la Wilaya du même nom, est située à une altitude de 157m, ses coordonnées géographiques sont 31° 58' latitude Nord, 5°20' longitude Est. Elle est limitée au Nord par Touggourt, au Sud par Hassi Messaoud, à l'Est par l'Erg Oriental et à l'Ouest par Ghardaïa.

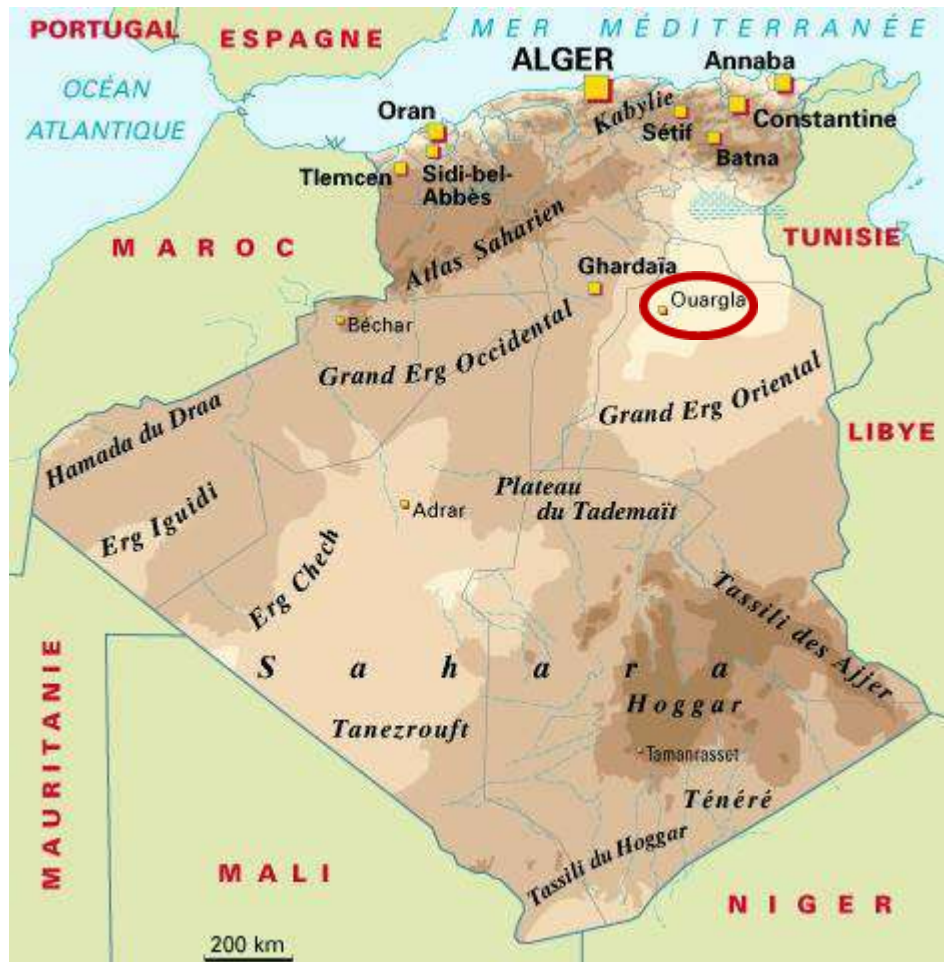


Figure 16 : Localisation géographique de Ouargla au sein de la région d'étude (CDARS,1999)

Les limites géomorphologiques sont au Nord : Sebkhet Safioune, à l'Est : Ergs Touil, au Sud les dunes de Sadrata et à l'Ouest le versant et la dorsale du M'Zab (Figure 16).

La région de Ouargla est constituée de 6 communes rassemblées en 3 daïras et chaque commune compte plusieurs localités comme il est présenté dans le tableau N° 9 :

Tableau 9 : Délimitation administrative de la région de Ouargla

Daïra	Communes	Localités
OUARGLA	Ouargla	Beni-Thour, Boughoufala, Mekhadema Hassi Miloud, Ksar, Bamendil, Saïd Otba, Bour El Haïcha.
	Rouissat	El-Hadeb, Sokra.
SIDI KHOULED	Sidi Khouiled	Oum Raneb, Aouinet Moussa.
	Ain Beida	Ain Beida, Chott, Adjada.
	Hassi Ben Abdallah	Hassi Ben Abdallah
N'GOUSSA	N'Goussa	L'Arbâa, El Bour, El Koum, Ghers Boughoufala, Debiche, Frane

2. Etude climatique

Ouargla est l'une des régions sahariennes de l'Algérie qui se caractérise par son hyperaridité. Cette aridité ne s'exprime pas seulement par les températures élevées et par la faiblesse des précipitations mais surtout par l'importance de l'évaporation due à la sécheresse de l'air (Lithellieux, 1984). Pour déterminer l'étage bioclimatique et la période sèche de l'année de la région d'étude, une synthèse bioclimatique est établie à partir des modèles climatiques par climagramme pluviothermique d'Emberger et de diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1953) (Figure 17 et 18).

2.1 Température

Les températures mensuelles à Ouargla de 2014 à 2023 sont synthétisées, analysées et mentionnées dans le tableau n° 10.

Tableau N° 10 : Températures mensuelles maximales, minimales et moyennes en °C à Ouargla pendant la période (2014 - 2023)

	Mois											
T (°C)	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
T min	4.6	7.4	10.7	15.7	20.7	26.1	28.3	28.0	24.5	17.3	11.8	6.4
T Max	18.9	21.2	25.1	30.6	35.4*	40.2*	43.9*	42.7*	38.8*	31.4	24.2	19.7
T moy	11.8	14.3	17.9	23.1	28.0	33.1	36.1*	35.3*	31.6	24.4	18.0	13.1

(www.TuTuempo.net, 2014-2023)

T min : température moyenne mensuelle minimale en °C, T Max : température moyenne mensuelle maximale en °C. T Moy : température moyenne mensuelle (Max+min/2), * : période critique pour le quinoa température moyenne >35°

Au cours de cette décennie (2014-2023), le tableau 10 montre que les températures les plus élevées ont été enregistrées en Juillet, avec une température maximale (TM) de 43.9 °C et température moyenne 36.1°C. Alors que, les températures les plus basses se manifestent en Janvier, atteignant avec 4.6 °C.

2.2 Précipitation

La région de Ouargla est caractérisée par la rareté et l'irrégularité de précipitation. Le cumul des précipitations durant la période 2013 à 2023 ne dépasse pas 27.6 mm (Tableau 11).

Tableau N° 11 : Précipitations mensuelles (mm) à Ouargla (2014-2023)

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Cumul
P (mm)	0.2	3.0	3.5	2.1	3.6	0.2	0.1	0.9	3.3	3.0	5.6	2.1	27.6

(www.TuTuempo.net, 2014- 2023)

Les mois les plus arrosés de l'année sont ceux de l'automne (Sep, Oct, Nov), avec un cumul de 11.9 mm de précipitations. En revanche, la période estivale (Jun, Juil et Aout) connaît de faibles précipitations, totalisant seulement 1,2 mm, et le mois de janvier est particulièrement sec avec seulement 0,2 mm de pluie. Dans la région de Ouargla, les précipitations sont considérées comme insignifiantes c'est pourquoi l'agriculture oasienne doit pouvoir absolument compter sur ses nappes phréatiques.

2.3-Vent

Selon OZENDA (1991), le vent agit comme facteur écologique limitant, qui favorise l'évaporation, surtout si la vitesse dépasse 15 km/h. ainsi qu'il agit directement sur le sol et les végétaux, soit indirectement en modifiant l'humidité et la température.

Tableau 12 : Vitesse du vent (km/h) moyennes mensuelles des vents (2014-2023)

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Aout	Seb	Oct	Nov	Déc	Moyenne
V(Km/h)	9.28	12.51	14.58	16.37	16.81	14.68	13.47	13.15	13.48	10.6	9.34	9.27	12.79

V : Vitesse moyenne du vent (km/h)

(www.TuTuempo.net, 2014- 2023)

Pour la région d'étude et pour la période précitée (2014-2023), les mois les plus ventés sont mai et avril (période printanière) avec des vitesses moyennes de 16.81 et 16.37 km/h respectivement (Tableau 12), la saison hivernale, notamment les mois décembre et janvier, est caractérisée par des vents faibles, avec des vitesses moyennes de 9,27 et 9,28 km/h respectivement. La moyenne annuelle est de 12.79 km/h.

2.4 Digramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls

Le diagramme ombrothermique de **BAGNOULS et GAUSSEN (1953)** est représenté par deux courbes sur un seul graphique. L'axe des abscisses représente les mois de l'année, tandis que l'axe des ordonnées à gauche indique les précipitations (P) en mm, et l'axe des ordonnées à droite montre les températures moyennes journalières mensuelles (T) en °C. L'échelle du diagramme est calculée à partir de la formule $P = 2T$. L'aire comprise entre les deux Courbes indique la période sèche ou humide, selon la superposition des courbes l'une par rapport à l'autre.

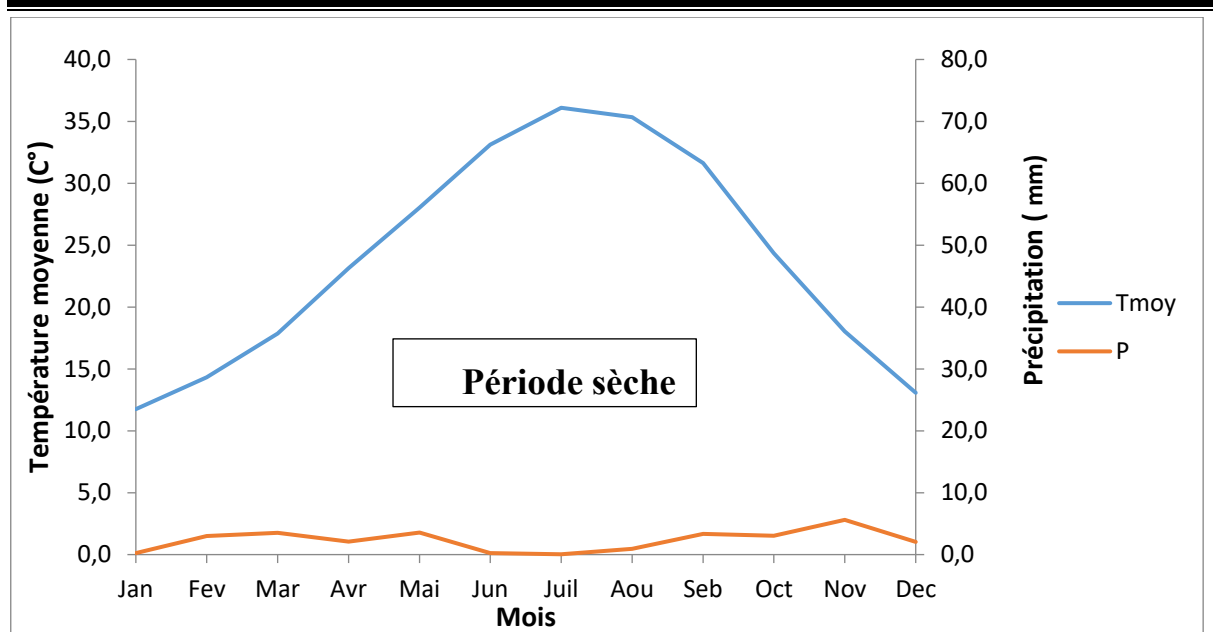


Figure 17 : Digramme Ombrothermique de Gaussen et Bagnouls de la région de Ouargla pour la période 2014-2023.

Pour la région de Ouargla nous constatons d'après la figure 17 en dessus que la période sèche s'étale sur toute l'année.

2.5 Climagramme pluviothermique d'Emberger

Le quotient pluviométrique d'Emberger "Q2" permet de situer la région d'étude dans l'étage bioclimatique qui lui correspond. Le quotient pluviothermique d'Emberger est corrigé par la formule suivante (Stewart, 1969) :

$$Q_3 = 3,43 \times P / (M - m)$$

Q₃: est le quotient pluviothermique d'Emberger

P: est la pluviosité annuelle en mm

M: est la moyenne des températures maximales du mois le plus chaud en °C.

m: est la moyenne des températures minimales du mois le plus froid en °C.

Les valeurs de chacune des régions concernées sont exposées.

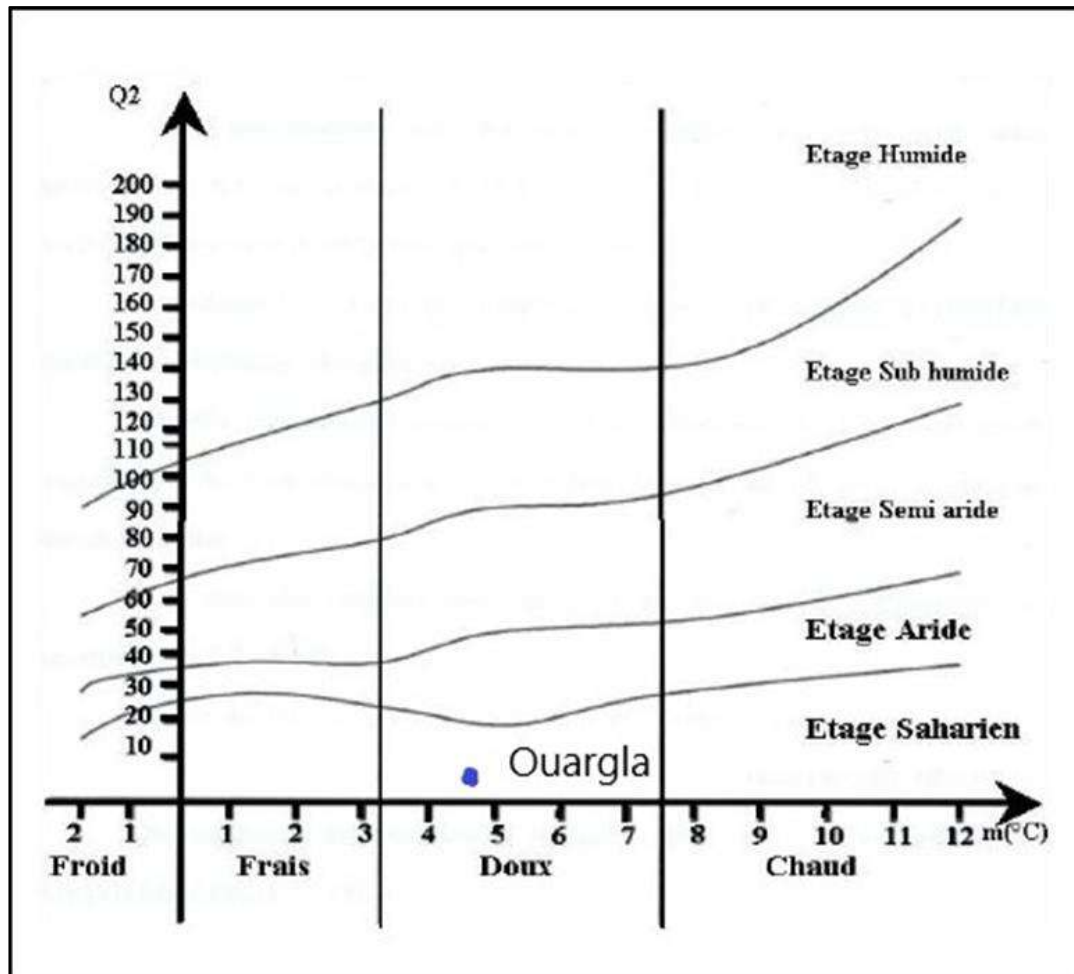


Figure 18 : Climagramme pluviothermique d'Emberger de la région de Ouargla

A partir des données climatiques de la région de Ouargla recueillies sur une période de 10 ans (2014 à 2023), la pluviométrie moyenne annuelle est de 27,6 mm. La température moyenne des maximale du mois le plus chaud est de 43,9°C, tandis que la température minimale moyenne du mois le plus froid de 4.6°C. De ce fait, la lecture du Climagramme d'Emberger, situe Ouargla dans l'étage bioclimatique saharien, caractérisé par hiver doux et son quotient pluviothermique (Q2) est de 2.40. (figure 18)

Chapitre III
Matériels et méthode

1. Matériel végétale

Les génotypes de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) étudiés sont en nombre cinq, originaire de différentes régions de plusieurs pays andins. Il s'agit de : *Santa Maria*, Giza1, *Amarilla Sacaca*, *Blanca de Junin* et *Kancolla*, fournis par l'ITDAS et dont la semence a été produite dans les parcelles des essais FAO, Les graines utilisées ne proviennent plus des semences originales fournies par la FAO en 2013-2014. Elles reflètent plutôt l'aspect qu'elles ont acquis après plusieurs années de culture en Algérie (ITDAS).

Le tableau 13 présente certaines caractéristiques des semences utilisées.

Tableau 13 : Description des génotypes de quinoa utilisés

Génotypes		Ecotype	Origine	Source	Couleur de semence
<i>Santa Maria</i>	V1	Salar	Cultivar de Bolivie	ITDAS	Blanche et marron
Giza1	V2	Quinoa du niveau de la mer	Cultivar d' Egypte	ITDAS	Beige
<i>Kancolla</i> (Q104)	V3	Altiplano	Variété du Pérou	ITDAS	Jaune, marron et beige.
<i>Blanca de Junin</i> (Q103)	V4	Quinoa des vallées	Variété du Pérou	ITDAS	Blanche
<i>Amarilla Sacaca</i> (Q102)	V5	Altiplano	Variété du Pérou	ITDAS	Orange

ITDAS : Institut Technique de Développement de l'Agriculture Saharienne

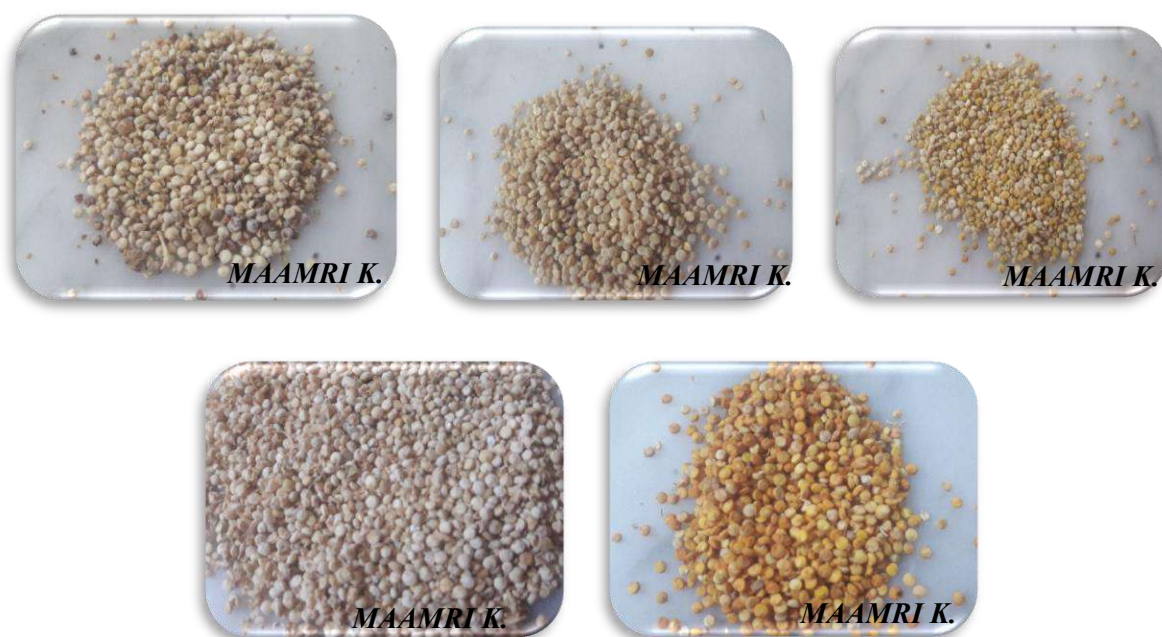


Photo 1 : Les semences de quinoa utilisés (de gauche haut à droite : *Santa Maria*, Giza1, Q104, Q103, Q102)

Les essais ont été menés pendant la période hivernale des campagnes 2019/2020 et 2020/2021 dans deux sites de la région de Ouargla, en plein champ et sous irrigation localisé (goute à goutte). Le premier site (1) est situé dans la ferme expérimentale de la faculté des sciences de la nature et de la vie de l'Université Kasdi Merbah dans la commune de Ouargla ($31^{\circ} 56' 20,82''$ N latitude, $5^{\circ} 17' 33,71''$ E longitude, altitude de 246 m). Le deuxième site (2) se situe au niveau de l'Institut Technique de Développement de l'Agriculture Saharienne, qui se trouve dans la commune de Hassi Ben Abdellah (ITDAS) ayant pour coordonnées $32^{\circ} 0' 25,59''$ N latitude, $5^{\circ} 27' 48,63''$ E longitude, altitude de 446 m (Figure19).

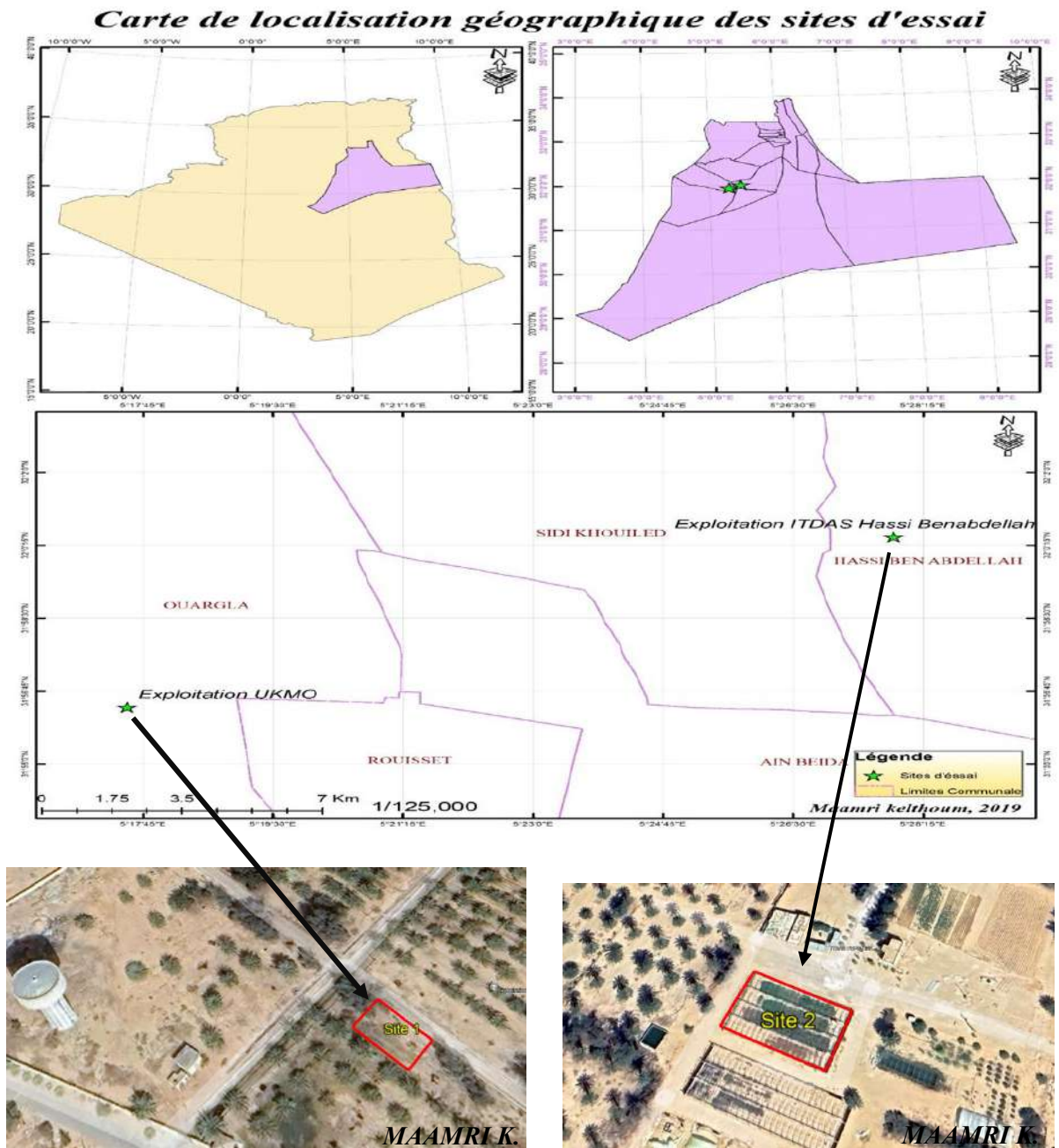


Figure 19 : Localisation des sites d'étude (Maamri, 2019)

2. Dispositif expérimental

Le même dispositif et protocole expérimental a été adopté dans les deux sites et sur les deux années d'étude, il s'agit d'un plan d'expérimentation en blocs aléatoires complets avec 04 répétitions, chaque traitement (génotype) est représenté une seule fois dans chaque bloc et la distribution des traitements s'est faite au hasard au sein du bloc (Figure 20 et photo 2). La superficie de chaque parcelle élémentaire est de 10 m². Chaque parcelle est composée de cinq rangées espacées de 40 cm entre elles ; l'espacement inter-plantes est de 20 cm. Les mesures sont effectuées sur les plantes de la ligne médiane de chaque parcelle.

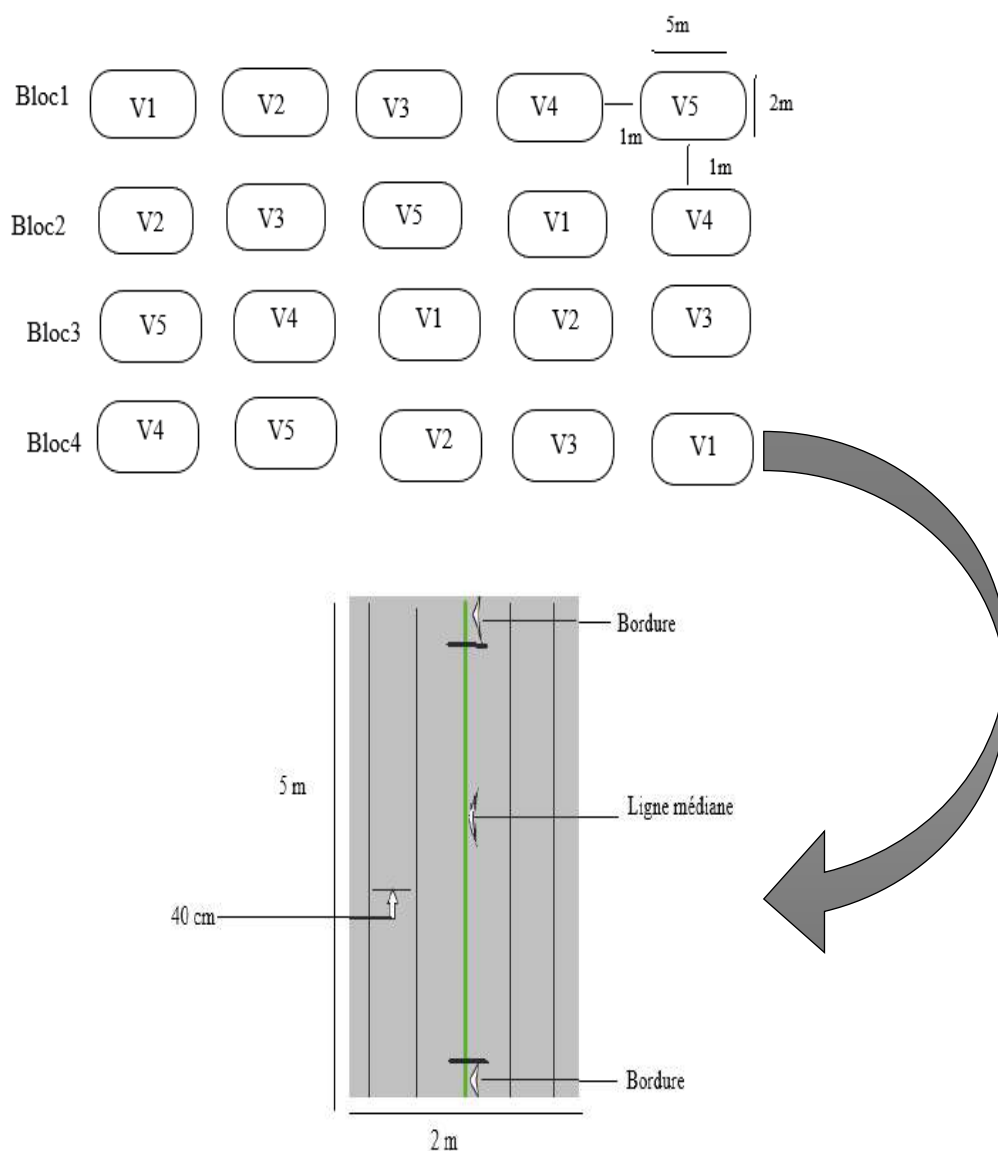


Figure 20 : Dispositif expérimental adopté (V1 : *Santa Maria*, V2 : *Giza1*, V3 : *Q104*, V4 : *Q103* et V5 : *Q102*)



Photo 2 : Préparation des sites expérimentaux

Le labour a été réalisé entre 25 et 30 cm de profondeur durant le mois de septembre, sur un terrain qui n'a jamais été travaillé auparavant, au niveau du site de l'université. Le précédent cultural est une jachère pendant plus de dix ans pour le deuxième site (ITDAS).

Les essais sont amendés avec 40 t/ha du fumier organique d'origine ovine, après on a effectué un nivellement du sol pour préparer le lit de semis, et une pré-irrigation afin d'ameublir le sol et faire germer les grains des mauvaises herbes.

Le semis a été fait le 17 et 26 octobre 2019 pour le site 1 et 2 respectivement et 15 /16 octobre 2020 respectivement pour les deux sites 1 et 2, il a été effectué entre 1 et 2 cm de profondeur, à raison de 4 graines par poquet. Une fois que la plante est bien installée (stade quatre feuilles), on a fait un éclaircissage afin de maintenir une seule plante par poquet. L'irrigation a été effectuée par le système goutte à goutte, le calendrier d'irrigation est établi sur la base du logiciel CROPWAT (8.0 Beta), les doses de l'irrigation ont été appliquées en fonction des besoins hydriques de chaque stade phénologique du quinoa, les besoins en eau réels sont estimés par 314,6 mm. L'irrigation a été arrêtée à la maturité physiologique (vingt jours avant la récolte).

La récolte a eu lieu manuellement le mois de février de chaque année. Des travaux d'entretien (désherbage), ont été effectués manuellement tout au long du cycle de la plante (Figure 21).

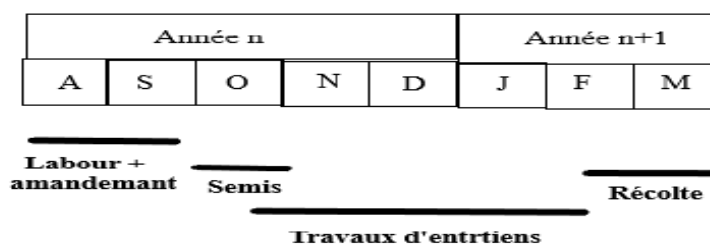


Figure 21 : Calendrier de conduite des essais de la culture de quinoa

3. Phénologie

Plusieurs échelles de développement ont été décrites pour le quinoa, pour notre étude nous avons choisi celle de Mujica et Canahua (1989) qui a réparti les étapes du développement de la plante de quinoa en 12 phases : 1) Levée, 2) deux feuilles vraies, 3) Quatre feuilles vraies, 4) Six feuilles vraies, 5) Ramification, 6) Début de formation de la panicule, 7) panicule, 8) Début de floraison, 9) floraison, 10) Grain laiteux, 11) Grain pâteux, 12) maturité physiologique. Les durées indiquées de chaque phase sont des nombres de jours moyens. Un stade est atteint lorsque 50% des plantes sont à ce stade.

4. Paramètres étudiés

L'échantillonnage a été effectué sur les individus de la ligne médiane de chaque parcelle, alors que les autres lignes ont servi comme bordure, en éliminant les individus des bordures (amont et aval).

Le choix des indicateurs de caractérisation et de suivi du développement des plantes s'est fait en utilisant l'ouvrage "Descripteurs pour le quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) et ses espèces sauvages apparentées" (Bioversity International, FAO, PROINPA, INIAF et FIDA. 2013).

Les individus échantillonnés sont considérés pour l'étude des caractères suivants : Hauteur de la plante (cm), Diamètre de tige (mm), Nombre de ramifications, Longueur panicule (cm), Diamètre panicule (mm), Poids de la matière fraîche aérienne (g), Nombre de panicules/plante, Poids de la matière sèche aérienne (g), Poids total sec biomasse aérienne (g), Indice de récolte. D'autres caractères quantitatifs à savoir le rendement de semence/plante (g), Poids de 1000 graines (g), Dimensions des graines (mm) (diamètre et épaisseur), Nombre des dents/feuille, Longueur de pétiole (mm), Longueur max des feuilles (mm), Largeur max des feuilles (mm), Nombre de jours pour atteindre la maturité. (De semis jusqu'à la maturité).

De même pour les caractères qualitatifs : forme des feuilles, type du bord des feuilles, couleur de la panicule au stade floraison, couleur de panicule à la maturité, présence de ramifications, forme de la panicule.

Pour les mesures quantitatives, il a été indiqué la moyenne des plantes prises de la ligne médiane (en évitant les plantes de bordure) et pour les mesures qualitatives en fonction du 50% des plantes de la population. Les caractères étudiés (qualitatifs et quantitatifs) sont dans leur majorité, ceux décrit dans le descripteur cité en dessus et ils sont présentés sur les tableaux (14 et 15).

Tableau 14 : Caractères quantitatifs (unité et signification).

Caractère	Unité	Signification
Hauteur de la plante	(cm)	Mesurée du collet de la racine au sommet de la panicule, au stade de maturité les plantes de la ligne médiane, à l'aide d'un mètre ruban
Diamètre de tige	(mm)	Mesuré dans la partie moyenne du tiers inférieur de la plante au stade de maturité au pied à coulisse
Nombre de ramifications,	-	Nombre total de ramifications primaires de la tige principale à la maturité
Longueur panicule	(cm)	Mesuré de la base à l'apex de la panicule principale à maturité, à l'aide d'un mètre ruban
Diamètre panicule	(mm)	Mesuré le diamètre maximal (de la partie médiane) de la panicule principale à la maturité, avec au pied à coulisse
Poids de la matière fraîche aérienne	(g)	Le poids de la tige et feuilles à la maturité à l'aide d'une balance électrique
Nombre de panicules/plante,	-	Nombre total des panicules par plante
Poids de la matière sèche aérienne	(g)	Le poids de la tige et feuilles à la maturité après séchage à 65°C pendant 72 h.
Indice de récolte (IR)	-	$IR = \text{Poids du grain} / \text{poids total sec de la biomasse aérienne}$
Rendement de grains/plante	(g)	Le poids de tous les grains par plante de la ligne médiane sans prendre en considération le périgone
Poids de 1000 graines	(g)	Le poids des grains sans prendre en considération le périgone
Dimensions des graines (diamètre et épaisseur)	(mm)	Moyenne de 20 grains sans prendre en considération le périgone au pied à coulisse
Nombre des dents/feuille,	-	Nombre total des dents par feuille, (une feuille par plante).
Longueur max des feuilles	(mm)	Description des feuilles du tiers médian de la tige principale, choisies en pleine floraison.
Largeur max des feuilles	(mm)	Description des feuilles du tiers médian de la tige principale, choisies en pleine floraison. Moyenne des plantes de la ligne médiane (une feuille par plante).
Longueur de pétiole	(mm)	Mesurer au pied à coulisse (une feuille par plante). Entre l'aisselle et le limbe
Nombre de jours de maturité. (De semis jusqu'à la maturité)	-	Nombre de jours du semis au chaque stade végétatif jusqu'à la maturité chez 50% des plantes selon l'échelle de Mujica et Canahua (1989)

Tableau 15 : caractères qualitatifs (signification).

Caractère	Signification
Forme des feuilles	Observé visuellement au stade plein floraison (peut-être : Triangulaire ou Rhomboïdale)
Type du Bord des feuilles,	Observé visuellement : entier, denté, dentelé
Couleur de panicule au stade de floraison	La couleur peut-être : Vert, Pourpre, Mélange
Présence ramification	Constater la présence ou l'absence des ramifications
Couleur de panicule à la maturité,	La couleur peut- être : Blanc, Pourpre, Rouge, Rose, Jaune, Orange, Marron, Gris Noir, Rouge et blanc, Rouge et rose, Rouge et jaune, Vert, Rouge et vert
Forme de panicule	La forme peut-être : Glomériforme (présence de glomérules dans les axes glomérulaires de forme globuleuse), ou Amarantiforme (présence de glomérules directement dans l'axe secondaire de forme allongée)

5 Exploitation statistique des données

L'exploitation statistique des données a été conduite de manière rigoureuse afin de répondre aux objectifs de l'étude comparative des différentes variétés de quinoa. L'ensemble des analyses a été réalisé à l'aide du logiciel R (version 4.5.0), en s'appuyant sur les packages spécialisés FactoMineR, factoextra, vegan, ggplot2, ggstatsplot et cluster.

Préparation des données

Les données brutes ont été importées à partir d'un fichier Excel (analyse.xlsx) en utilisant la fonction read.xlsx du package open.xlsx. Un nettoyage initial a été effectué afin de supprimer les lignes contenant des valeurs manquantes, garantissant ainsi la robustesse des analyses multivariées.

Les variables ont été distinguées selon leur nature :

Paramètres qualitatifs : Forme_Feuil, Bord_Feuil, Coul_Panc_F, Prés_Abs_Ram, Coul_Panic_M, FormPanic ;

Paramètres quantitatifs : Nbre_dents_feuille, Long_pétiole, Long_max_Feuille, Larg_max_Feuille, Haut_plante, Diam_tige_princ, Nbre_1_prim, Pds_MF_Ae, Pds_MS_Ae, Prod_Plante, Long_Panic, Diam_Panic, Nbre_Panic_Plante, Indice_Récolte, Diametre graine, Epaisseur graine, PMG.

5.1. Analyses statistiques univariées

Chaque variable quantitative a été soumise à un test de normalité (test de Shapiro-Wilk). Selon les résultats, une analyse de la variance (ANOVA) ou un test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été réalisé, suivi d'un test post-hoc de Tukey ou Dunn, respectivement. Pour les variables qualitatives, des tests du χ^2 d'indépendance ont été utilisés afin d'évaluer les associations entre modalités et variétés. Des représentations graphiques types boxplots, violin plots et barplots empilés ont permis de visualiser les répartitions intra- et inter-variétales.

5.2. Analyse factorielle des données mixtes (FAMD)

Une Analyse Factorielle des Données Mixtes (FAMD) a été conduite à l'aide de la fonction FAMD du package FactoMineR. Cette méthode permet de projeter simultanément les variables qualitatives et quantitatives dans un espace factoriel, tout en tenant compte de la contribution de la variable explicative principale (Variété).

Les individus ont été représentés sous forme de nuages de points colorés selon les variétés, avec ajout d'ellipses de confiance à 99 % pour visualiser la dispersion des groupes. Les paramètres agronomiques ont été superposés sous forme de labels afin de mieux interpréter leur contribution aux dimensions principales.

Chapitre IV
Résultats et discussion

1. Le climat

Les données climatiques ont été obtenues à partir de la station météorologique de Ouargla. La comparaison des moyennes des cumuls mensuels de température et de précipitations au cours des saisons de croissance (Octobre à avril) des deux années de l'expérimentation a montré que les valeurs moyennes des températures étaient très proches, avec respectivement 17,5 et 17,8 °C. Alors que la précipitation en 2019- 2020 était négligeable (1.30 mm) et nulle en 2020–2021. Les comparaisons des mois au sein des périodes expérimentales ont révélé des différences non considérables (Figure 22).

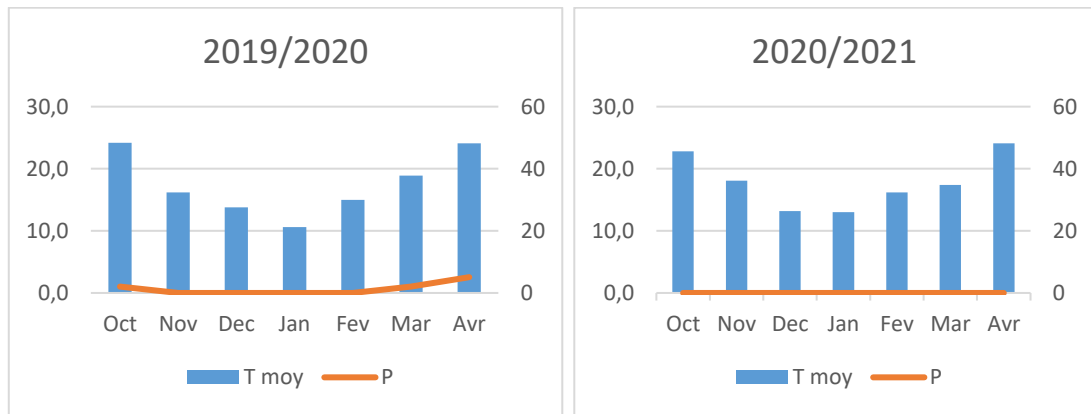


Figure 22. Diagramme ombrothermique de Gaussen pour la période octobre avril de la région de Ouargla (désert du Sahara algérien) pour deux périodes de culture du quinoa (2019/2020 et 2020 /2021)

2. Caractéristique du sol

Les échantillons de sol ont été prélevés au sein de l'horizon arable (sur une profondeur de 30 cm) dans les deux sites dans la région d'étude, pour les années 2019 et 2020. Pour chaque site, les échantillons ont été séché à l'air, tamisé à 2 mm et soumis à analyse au laboratoire de ANRH. La caractérisation physique et physico-chimique moyenne du sol (sur les deux années d'étude) avant plantation au niveau des deux sites expérimentaux est consignée dans le tableau 16 ci-dessous.

Tableau 16 : caractéristiques physicochimiques du sol

Paramètres	Sable (%)	Limon+ argile	pH (1/5)	CE (ds/m) (1/5) 25°C	Eléments en (még/l)							
					Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻
site 1 (Universit)	90,25	9,75	7.89	9.95	14.5	2.34	69.6	18.11	96.94	64.48	0	1.35
site 2 (ITDAS)	89,82	10,18	7.54	0.83	2.57	0.27	1.31	1.6	2.48	5.37	0	0.75

(ANRH : Agence National des Ressources Hydrauliques)

ANRH ,2020

Le sol dans la région de Ouargla est caractérisé dans l'ensemble par une texture sableuse, un pH basique, de faibles teneurs en argile,

Le sol utilisé dans le présent essai est caractérisé par une texture sableuse, un faible taux d'argile (%), un pH alcalin pour les deux sites (7.89 et 7.54) site 1 et site 2 respectivement et une conductivité électrique très élevée (CE) (9.95 ds/m) pour le site 1 et une faible salinité pour le site 2 (0.83 ds/m).

3. Caractéristiques physico-chimiques de l'eau d'irrigation

L'eau d'irrigation est pompée à partir de complexe terminale (nappe sénonien) pour le site 1 (68 m) et celle de complexe intercalaire (nappe albien), pour le deuxième site qui se trouve à une profondeur de 250 m. Les eaux se caractérisent par un pH alcalin (7.71 et 7.85) et une forte salinité avec une conductivité électrique très élevée (3,03 et 2,45 ds/m) pour les deux sites 1 et 2 et appartiennent à la classe C4 (CE entre 2,25 et 5 dS/m) Selon USSL (Classification de l'eau d'irrigation) (Richards, 1954; USSL,1954) (Tableau 17).

Tableau 17. Caractéristiques physico-chimiques de l'eau d'irrigation

Paramètres	pH	CE (ds/m) 25°C	Eléments en (méq/l)								Résidus sec (g/l) à 105°C
			Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	
Eau (site 1)	7.71	3.03	190	16	390	117.8	660	794	0	167.75	2527
Eau (site 2)	7.85	2.45	157.7	26	265	98.6	462	612.5	0	231.8	1986

(ANRH : Agence National des ressources hydraulique)

ANRH, 2020

4. Cycle de croissance (stades phénologiques)

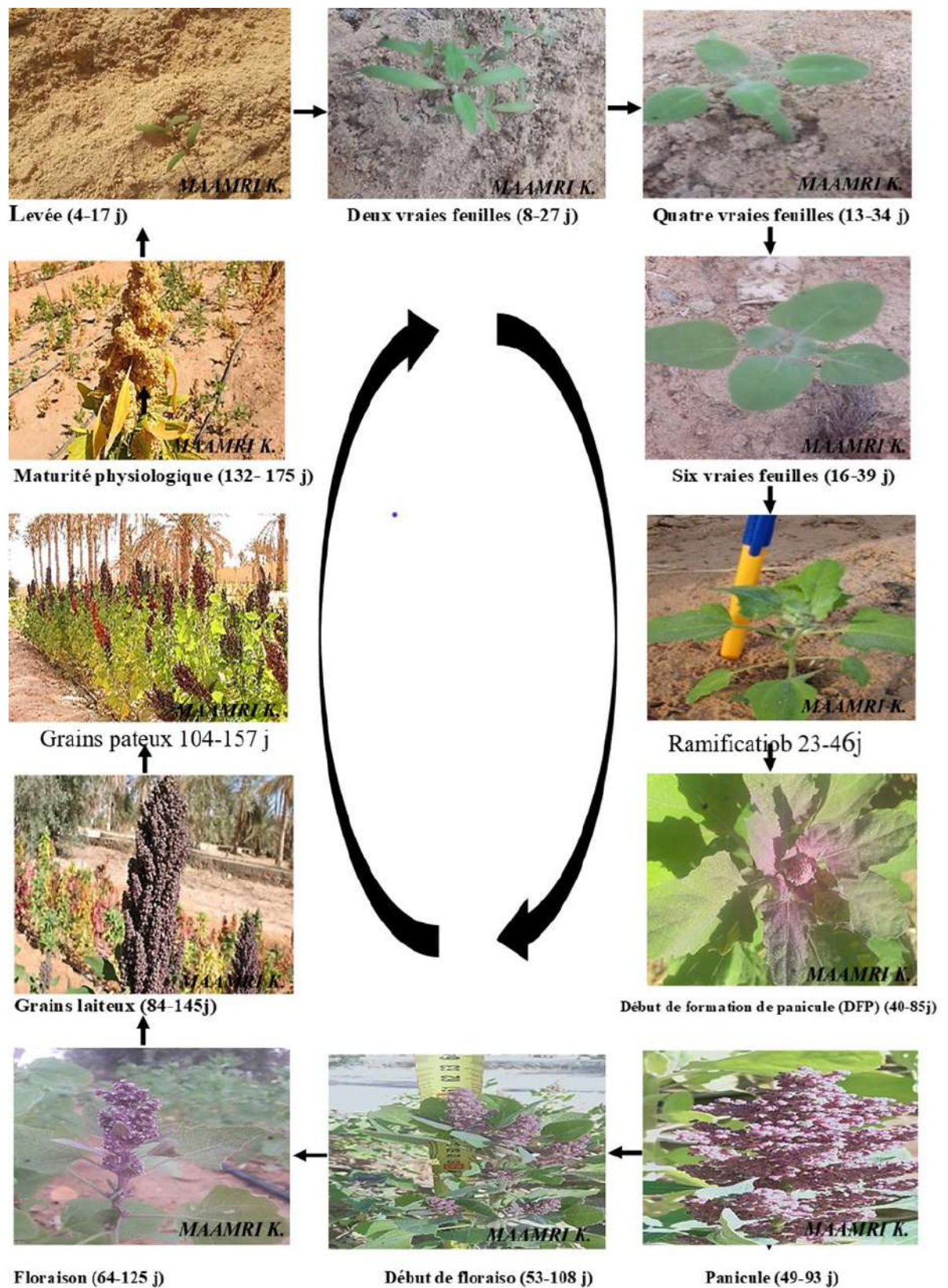


Figure 23 : Cycle végétatif de quinoa (original)

De nombreuses études ont étudié et décrit les stades phénologiques du quinoa (Stanschewski et al, 2021 ; Sosa-Zuniga et al, 2017 ; Bertero et al, 1996). Ces études ont fourni des informations pertinentes sur la caractérisation de la culture ; cependant, dans notre étude on a suivi l'échelle proposé par Mujica et Canahua (1989) car il est relativement détaillé et le plus adapté au développement des plantes dans notre expérimentation, ainsi qu'il figure dans le "Descripteurs pour le quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) et ses espèces sauvages apparentées" (Bioversity International, FAO, PROINPA, INIAF et FIDA. 2013) sur lequel on a basé le choix des indicateurs dans notre étude.

4.1 Levée

Il s'agit de l'émergence de la plantule et de la mise en place des deux feuilles cotylédonaire. Elle se manifeste quatre à dix- huit jours après le semis.



Photo 3 : Stade levée (deux feuilles cotylédonaire)

4.2 Deux vraies feuilles

Les premières vraies feuilles se manifestent entre 08 et 27 jours après le semis, accompagnées d'une croissance rapide des racines. Au contraire des feuilles cotylédonaire, elles sont rhomboïdales et triangulaire. Elles sont extrêmement vulnérables à l'attaque des insectes et oiseaux.



Photo 4 : Stade deux vraies feuilles

4.3 Quatre vraies feuilles

Les deux vraies feuilles nouvelles se développent entre 13 et 34 jours après le semis. Les cotylédonaire ont toujours des feuilles vertes. Dans cette phase, la plantule démontre une résistance assez élevée.



Photo 5 : Stade Quatre vraies feuilles

4.4 Six vraies feuilles

La troisième paire de feuilles vraies apparaît entre 16 et 39 jours après le semis, alors que les feuilles cotylédonaire commencent à se détacher. L'extrémité végétative est très bien protégée par les feuilles les plus anciennes.



Photo 6 : Stade Six vraies feuilles

4.5 Ramification

Dès le stade de huit feuilles, c'est-à-dire 23 à 46 jours après le semis, les variétés qui ramifient peuvent observer la présence de bourgeons axillaires jusqu'au troisième nœud. On ne voit pas encore l'inflorescence, qui est recouverte et protégée par les feuilles. Cependant, il est possible que cette phase se chevauche avec la phase précédente ou antérieure.



Photo 7 : Stade Ramification

4.6 Début de formation de la panicule (DFP)

Au bout de 40 à 85 jours, l'inflorescence commence à se former à l'apex de la plante, entourée d'une série de feuilles de petite taille qui la recouvrent encore en partie. En même temps. La tige devient plus longue et plus large. Les feuilles cotylédonaire sont jaunes et disparaissent.



Photo 8 : Stade début de formation de la panicule (DFP)

4.7 Panicule (P)

On voit maintenant l'inflorescence au-dessus des feuilles et les glomérules qui la composent. On observe l'apparition de boutons floraux personnalisés entre 49 et 93 jours après le semis. La première paire de vraies feuilles devient jaune.



Photo 9 : Stade panicule (P)

4.8 Début de floraison (DF)

Les premières fleurs s'ouvrent. 53 à 108 jours après le semis. La plante commence à être plus sensible au froid et à la sécheresse (Geerts et al, 2006 ;2008). Pour observer les fleurs de quinoa, il est préférable de le faire à la mi-journée c'est le moment où les fleurs de quinoa sont généralement le plus ouvertes. Les fleurs ont tendance à se refermer pendant la nuit, avec une loupe car les fleurs de quinoa sont très petites et leurs structures reproductrices sont difficiles à distinguer à l'œil nu. Cette phase coïncide avec le début de saison hivernale (début de décembre).



Photo 10 : Stade début de floraison (DF)

4.9 Floraison (F)

La moitié des fleurs de l'inflorescence s'ouvrent vers le 64^{ème} et le 125^{ème} jour. Il est recommandé de faire cette observation à la mi-journée, car les fleurs se referment pendant la nuit. La plante est la plus vulnérable aux gelées pendant cette phase.



Photo 11 : Stade de floraison (F)

4.10 Grain laiteux

Le grain est considéré comme laiteux entre 84 et 145 jours après le semis, car il émet un liquide laiteux (blanchâtre) lorsqu'il est soumis à une pression sur le fruit. Durant cette phase, la plante est très sensible au manque d'eau permettant le remplissage des grains (baisse du rendement).



Photo 12 : Stade grain laiteux

4.11 Grain pâteux

Les fruits deviennent pâteux à l'intérieur, de couleur blanche, environ 104 à 157 jours après le semis.



Photo 13 : Stade grain pâteux

4.12 Maturité physiologique

Le grain atteint sa maturité après 132 à 175 jours, et devient plus consistant à la pression depuis la floraison, la majorité des feuilles sont jaunes et tombées au point que la défoliation est presque complète à maturité.



Photo 14 : Stade maturité physiologique

Mujica et Canahua (1989) décrivent 12 stades de croissance, le premier stade de la levée commence par le semis et se termine par l'émergence des deux cotylédons à travers la surface du sol. Ce stade se déroule entre 04 et 07 jours dans le site 1 et pendant la 1ère saison, Q102, Q104 et Giza ont la période la plus courte (04 jours), alors que Q103 et *santa maria* la période

d'émergence était entre 06 à 07 jour, en revanche au niveau de 2ème site la période de levée est relativement lente pour toutes les variétés et s'est déroulée entre 07 et 18 jours (Figure 23, 24). Q102, Q104 et Giza ont la période la plus courte (07, 08 et 09 jours), alors que pour Q103 et *Santa maria*, le stade levé était plus long (12 et 18). Le même cas pour la deuxième année ce stade s'étale entre 04 et 07 jours pour le site 1 et entre 07 et 12 jours pour le site 2 (Figure 26. 27)

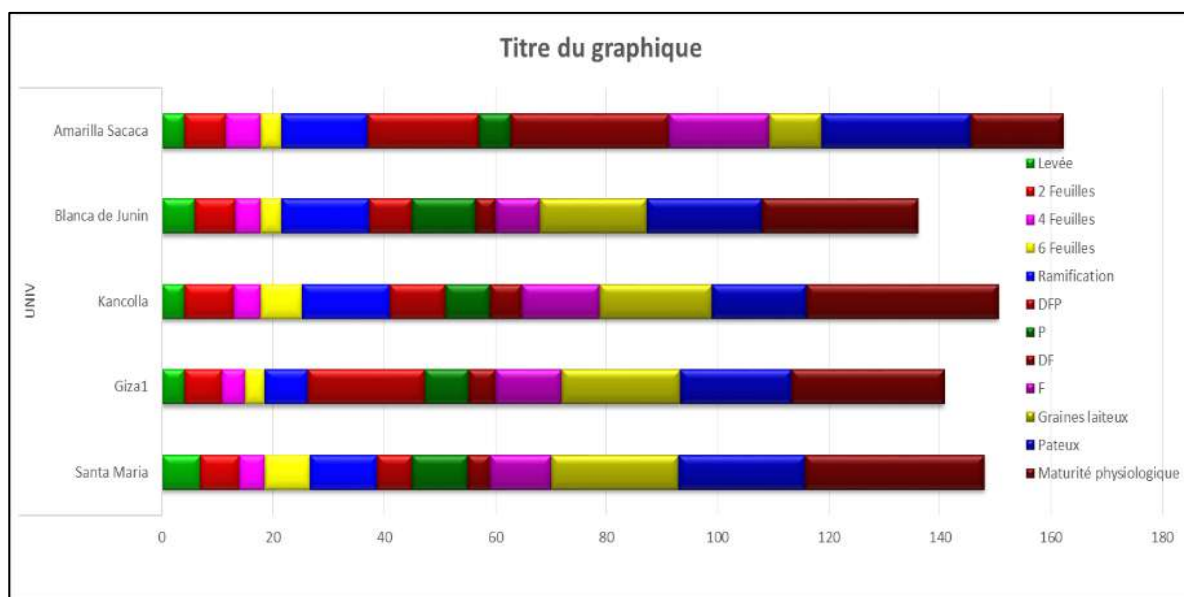


Figure 24 : Stades phénologiques de quinoa pour le site 1 première année

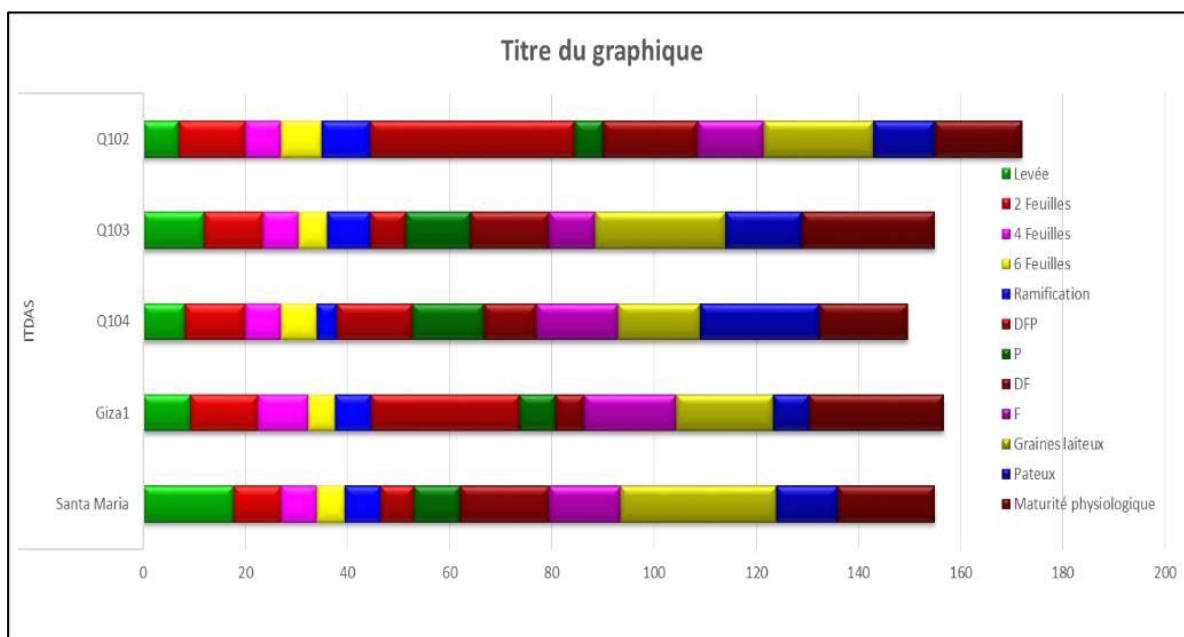


Figure 25 : Stades phénologiques de quinoa pour site 2 première année

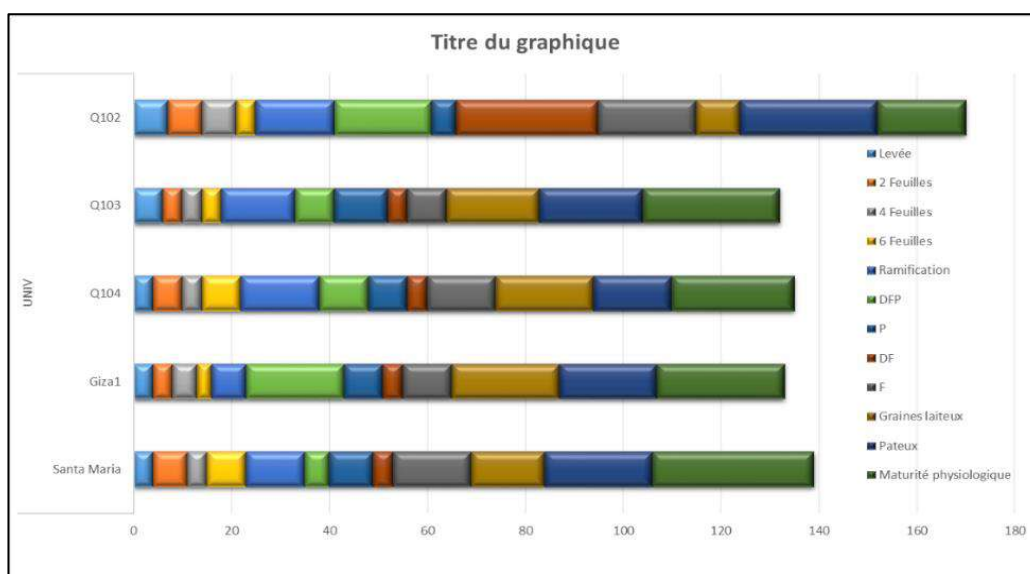


Figure 26 : Stades phénologiques de quinoa pour le site 1 deuxième année (2021)

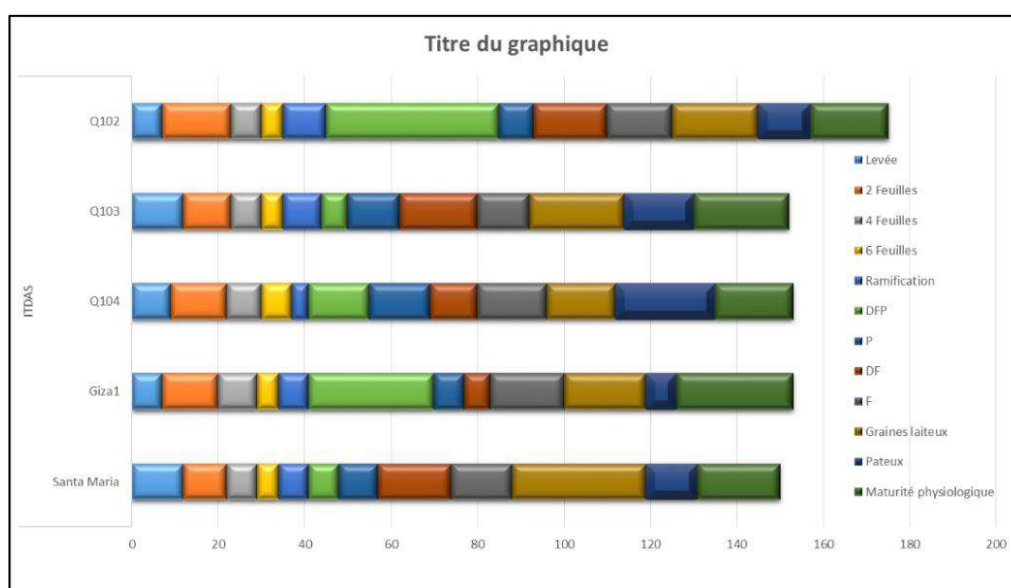


Figure 27 : Stades phénologiques de quinoa site 2 deuxième année (2021)

On peut considérer la deuxième phase comme le début de **la phase de croissance végétative** qui regroupe les quatre stades phénologique (02 feuilles, 04 feuilles, 06 feuilles et ramification). Cette phase s'étale pendant une période de 22 jours jusqu'à 37 jours et les différences dépendent à la fois de la variété et du site. La variété qui a une durée de croissance la plus courte est Giza en site 1 (22 jours), alors les autres variétés ont une durée de croissance presque similaire (entre 31 jours et 37 jours). Pour le site 2, la variation de durée de croissance entre variétés est faible,

maximum 10 jours entre la plus courte *Santa Maria* (28 jours) et la plus longue pour Q102 (37 jours).

La troisième phase est la phase de **l'apparition de l'inflorescence** qui regroupe deux stades (début de panicule et panicule), elle commence par l'émergence de l'inflorescence dans la pousse principale qui a lieu généralement après le développement des feuilles. Au début les bourgeons de l'inflorescence sont invisibles car ils sont recouvert par les feuilles (stade début de formation de panicule), puis après l'inflorescence ils deviennent nettement visibles en haut après l'élongation de tige et des jeunes feuilles (stade panicule). Les panicules de toutes les variétés sont de couleur verte sauf pour Q102 qui présente une couleur Pourpre (mauve). Cette phase est étalée entre 16 et 29 jours pour le site 1 et entre 15 et 45 jours pour le site 2. La durée la plus courte de cette phase est celle de *Santa Maria* et la plus longue est pour Giza et Q102 dans les deux sites.

La quatrième phase est la floraison c'est-à-dire **l'ouverture et l'épanouissement des fleurs**, qui regroupe aussi deux stades (début de floraison et pleine floraison). Elle est très importante pour estimer la précocité en particulier car c'est aussi une phase critique de sensibilité aux températures élevées et aux gelées (Cannahua et Rea, 1979). Cette phase commence après l'émergence de premières anthères et se termine après l'ouverture de plus de 50% des fleurs. Cette phase s'étale entre 12 et 47 jours pour le site 1 et entre 24 et 32 jours pour le site 2. La durée du semis jusqu'à la floraison est estimée entre 68 jours et 109 jours pour le site 1, et entre 88 et 121 jours pour le site 2. Q103 a présenté le délai le plus court dans les deux sites, 68 et 88 jours respectivement. En revanche Q102 a présenté le délai le plus long du semis jusqu'à la floraison dans les deux sites.

La cinquième phase est **le développement des grains** qui regroupe trois stades (laiteux, pâteux et maturité physiologique). Cette phase décrit les stades de développement des grains, selon Mujica et Canahua (1989), à travers le changement de couleur du péricarpe et le taux d'humidité (modification de texture). Le grain laiteux présente une couleur de péricarpe verte chez toutes les variétés sauf Q102 présente une couleur pourpre, qui facilement s'écrasait avec les doigts en sécrétant un liquide blanc, les feuilles basales commencent à jaunir et se dessèchent. Après les grains deviennent pâteux, lorsqu'on les écrase avec les doigts, ils libèrent un contenu sous forme de pâte blanche. A la fin de stade laiteux et début de stade pâteux, le péricarpe change sa couleur en beige pour Q103, Giza et *Santa maria* et en rouge pour Q102 et devient même multicolore entre le marron, rouge et le beige pour Q104. Puis, en fin de ce stade vers la

maturité, les grains prennent un contenu sec et dur, et on ne pouvait plus les écraser entre les doigts, leurs péricarpes ont des couleurs entre le beige (Giza), blanc et blanchâtre (Q103 et Santa maria), orange (Q102) et marron beige jaune (Q104).

Il est important de signaler qu'à un moment donnée la plante de quinoa peut présenter en même temps des fruits aux différents stades (laiteux pâteux, maturité) sur la même panicule. Lorsque la panicule est complètement mature la plante est apte à être récolté.

On a subi des attaques importantes par les oiseaux notamment sur le site 2 la première saison de culture pendant la phase (laiteux, pâteux) ce qui a engendré une chute de rendement en grains. Pour cette raison la récolte peut être recommandée avant que les plantes ne parviennent à ce stade final (maturité total) afin d'éviter la perte de graines provoquée par l'éclatement ou l'alimentation des oiseaux (Stanschewski et al, 2021).

Cette phase a pris une durée moyenne entre 53 et 78 jours pour le site 1 et entre 50 et 66 jours pour le site 2. La durée la plus courte est marquée chez la variété Q102 dans les deux sites (53 et 50 jours), néanmoins qu'elle est tardive et elle a la plus longue durée de semis jusqu'à maturité dans les deux sites (162 et 172 jours). Cette tardivité revient à la longueur des deux stades : Début de formation de panicule et floraison.

Le même cas pour la 2^{ème} saison, Q102 a la durée de croissance la plus longue (170 et 175 jours) pour les deux sites, 1 et 2 respectivement, en revanche les autres génotypes ont des durées totales de croissance similaires entre 132 et 139 jours pour le site 1 et entre 150 et 153 jours pour le site 2 (Figure 26 et 27).

Compte tenu de durée totale de croissance (en moyenne sur les deux années), on peut classer les génotypes en deux groupes :

Le premier groupe : rassemble les génotypes à moyenne durée de croissance, Q103, Giza 1, Q104 et *Santa Maria* (avec respectivement 134, 137.5, 142.5 et 143.5 jours) pour le site 1 et (153.5, 154.5, 151.5 et 152.5 jours) pour le site 2.

Le deuxième groupe : contient l'unique génotype à longue durée de croissance (Q102) avec 166.5 et 173.5 jours pour les sites 1 et 2 respectivement. La différence entre sites est due probablement à l'altitude et la différence de salinité du sol.

5 Caractérisation agro morphologique des variables quantitatives

Nous avons mené les essais en plein champ sur cinq génotypes de quinoa dans des conditions désertiques arides du sud-est de l'Algérie, sur deux sites différents et pendant deux saisons de croissance. L'analyse des données a révélé que les génotypes étaient le facteur principal responsable des variations observées pour la plupart des paramètres étudiés.

En revanche, les interactions entre le génotype, l'année de culture et le site (génotype $\times$ année et site $\times$ génotype) n'ont pas montré de variations significatives. Ce résultat est crucial car il indique que les génotypes sélectionnés sont stables pour la plupart des caractéristiques mesurées, indépendamment de l'année ou du site de culture. Par conséquent, pour simplifier l'analyse, nous avons pu traiter les résultats en utilisant la moyenne des données sur les deux années.

5.1 Hauteur de la plante

Test de Kruskal-Wallis est très hautement significatif, $p\text{-value} = 1.18\text{e-}46$, valeur extrêmement faible (< 0.05) indique une différence significative entre les variétés.

Des comparaisons multiples entre variétés sont réalisées à l'aide de Test post-hoc de Dunn avec correction de Bonferroni pour identifier les différences significatives.

Comparaisons significatives ($p\text{-values}$ ajustées avec Bonferroni) :

- Giza - Q103 : $p.\text{adj} = 8.84\text{e-}17$ (significatif)
- Q102 - Q103 : $p.\text{adj} = 2.98\text{e-}24$ (significatif)
- Giza - Q104 : $p.\text{adj} = 2.92\text{e-}19$ (significatif)
- Q102 - Q104 : $p.\text{adj} = 1.51\text{e-}27$ (significatif)
- Q102- Santa_Maria: $p.\text{adj} = 1.92\text{e-}19$ (significatif)
- Giza - Santa_Maria : $p.\text{adj} = 3.97\text{e-}13$ (significatif).

Les autres comparaisons ne montrent pas de différences significatives ($p.\text{adj} > 0.05$)

Groupes homogènes et moyennes

Génotypes	Moyenne	Groupes homogènes
Giza	57.28	a
- Q102	63.53	a
- Q103	32.66	b
- Q104	33.38	b
- Santa_Maria	33.88	b

Les génotypes Giza et Q102 appartiennent au groupe supérieur (a) avec une hauteur moyenne plus élevée (57,28 cm et 63,53 cm) respectivement, tandis que Q103, Q104, et *Santa_Maria* forme un groupe inférieur (b), avec des valeurs moyennes entre 32,66 cm- 33, 38 cm- 33,88cm.

Dispersion des valeurs

Les génotypes Q102 et Giza montrent une plus grande variabilité de hauteur, avec des valeurs extrêmes plus dispersées. Q103, Q104 et *Santa Maria* ont des distributions plus compactes, suggérant une croissance plus homogène (Figure 28).

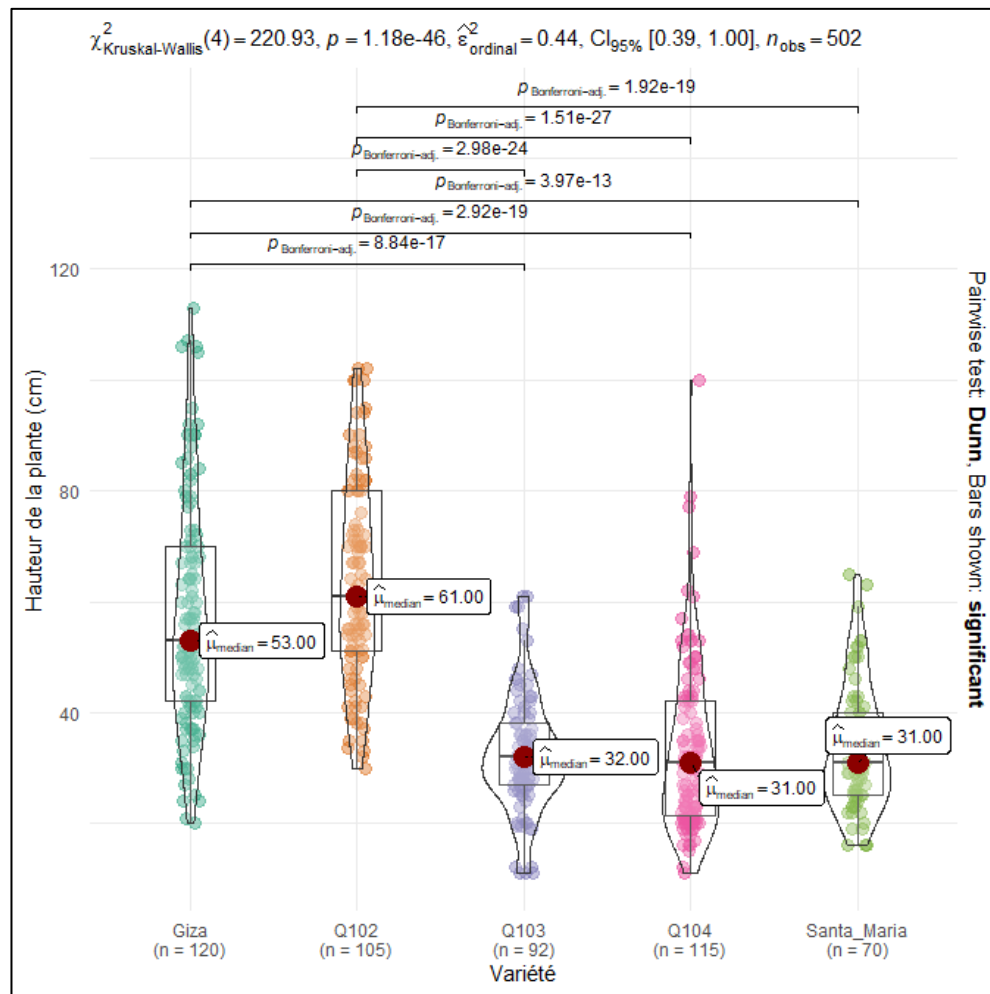


Figure 28 : Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, permettant de comparer la hauteur des plantes (en cm) entre différents génotypes.

5.2. Diamètre de la tige

Selon le Test de **Kruskal-Wallis** en termes de diamètre de tige. La p-valeur très faible $p=1.77e-23$ ($p<0.05$) indique une différence significative entre les variétés.

Les comparaisons multiples avec Post-hoc de Dunn ajustement Bonferroni montrent plusieurs différences significatives sur la figure 29.

Plusieurs comparaisons entre les génotypes ont été effectuées, les p-valeurs ajustées (p Bonferroni-adj) sont très faibles (< 0.05), indiquant des différences significatives entre plusieurs paires de génotypes.

Groupes homogènes et moyennes

Génotypes	Moyenne (mm)	Groupes homogènes
Giza	7.40	ab
Q102	9.19	a
Q103	4.95	c
Q104	6.42	b
<i>Santa_Maria</i>	4.98	c

- La classification en groupes homogènes montre que Q102 possède les tiges les plus épaisses (9.19 mm) (a), suivie par Giza (7.4 mm) (ab), ces génotypes pourraient être plus robustes et mieux résister aux stress mécaniques (vent, à la verse etc.). Tandis que Q103 et *Santa Maria* (c) ont les plus petits diamètres de tige ($\approx 4.95 - 4.98$ mm), Ces variétés pourraient être plus fragiles ou adaptées à des conditions spécifiques exemple dans des systèmes de culture plus denses (sous-palmiers).
- Dispersion importante dans certaines variétés :

Q102, Giza et Q104 présentent une plus grande variabilité dans les diamètres des tiges. Cela pourrait refléter une variabilité génétique plus forte.

- *Santa Maria* et Q103 ont des distributions plus serrées, indiquant une meilleure homogénéité des tiges.

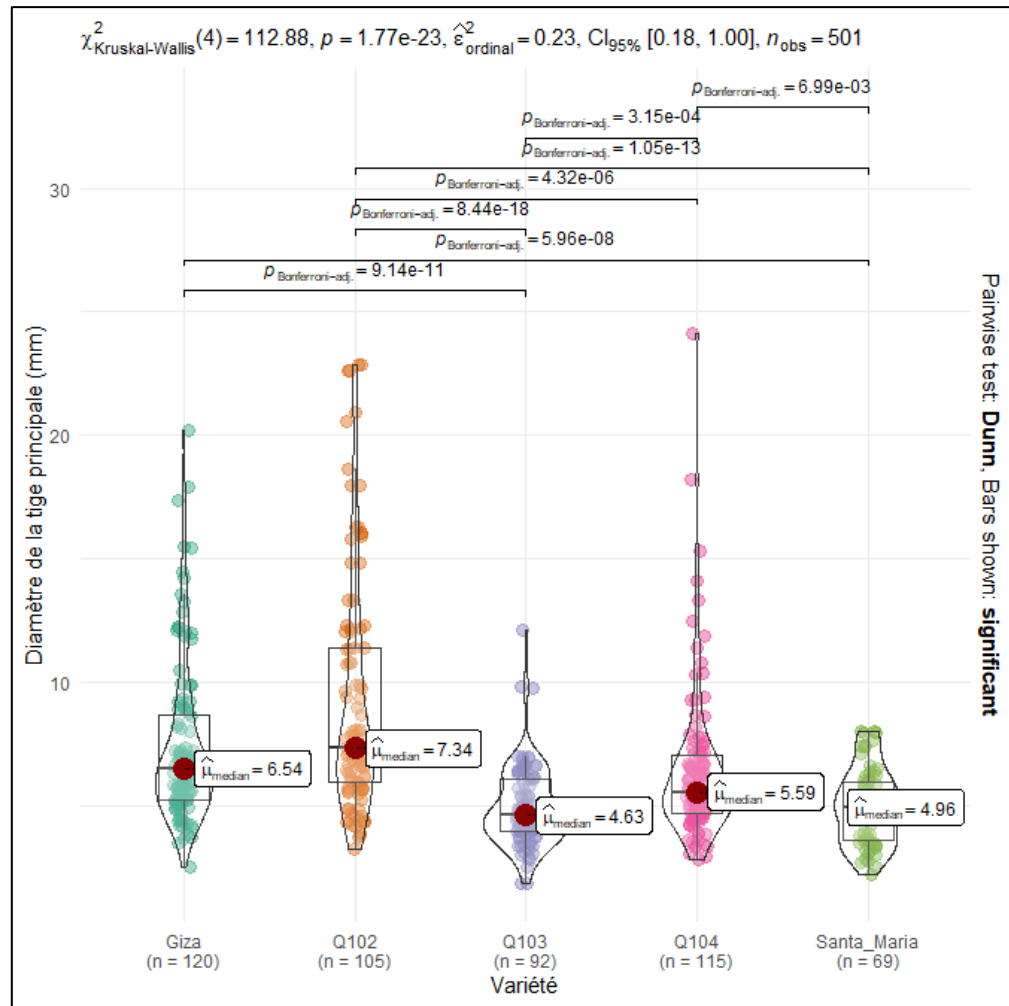


Figure 29 : Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, permettant de comparer le diamètre de la tige principale (en mm) entre différents génotypes.

5.3. Nombre de ramifications primaires :

La p-valeur de Test de Kruskal-Wallis est 0.04 (< 0.05) révèle une différence significative, suggérant que les génotypes ne possèdent pas le même potentiel de ramification primaire. Toutefois, l'effet observé est moins marqué que celui constaté pour la hauteur et le diamètre des tiges. Il est donc nécessaire de recourir au test post-hoc de Dunn afin d'identifier précisément quels génotypes diffèrent significativement les uns des autres.

Le test post-hoc a été réalisé pour identifier les différences spécifiques entre les génotypes. Seule la comparaison entre Q103 et Q104 s'est révélée statistiquement significative ($p = 0.03$ après ajustement Bonferroni), indiquant que la variété Q104 a significativement plus de ramifications primaires que Q103. Donc seule une paire de variétés montre une différence

significative, cela signifie que la majorité des comparaisons entre génotypes ne révèlent pas de différences significatives.

Le génotype Q104 semble présenter ayant le plus grand potentiel de ramification, ce qui constitue un atout potentiel pour l'augmentation de la production de biomasse.

Les groupes homogènes ont été établis sur la base des moyennes du nombre de ramifications primaires :

Génotypes	Moyenne	Groupe
Giza	2.41	ab
Q102	3.63	a
Q103	1.19	b
Q104	3.11	a
<i>Santa Maria</i>	2.26	ab

- Q103 est isolée dans le groupe b, montrant qu'elle possède significativement moins de ramifications. Les variétés Q102 et Q104 appartiennent au groupe (a), signifiant qu'elles possèdent plus de ramifications, les autres variétés (Giza, *Santa Maria*) se trouvent dans le groupe (ab), signifiant qu'elles partagent des caractéristiques intermédiaires.

L'analyse du graphique montre (Figure 30) que les médianes des variétés sont toutes proches de zéro, indiquant que la majorité des plantes n'ont pas ou très peu de ramifications primaires.

- Il existe cependant quelques individus présentant des valeurs élevées (jusqu'à 20 ramifications primaires dans certains génotypes), expliquant la dispersion des données.
- Les intervalles de confiance montrent des différences faibles mais significatives, confirmées par les analyses statistiques.

Globalement, ces génotypes ne produisent pas de ramifications primaires de manière systématique, la différence entre variétés étant faible et peu significative, la sélection variétale pour cette caractéristique semble non pertinente. Les ramifications peuvent être influencées par d'autres facteurs comme les conditions environnementales (fertilisation, espace de croissance,...)

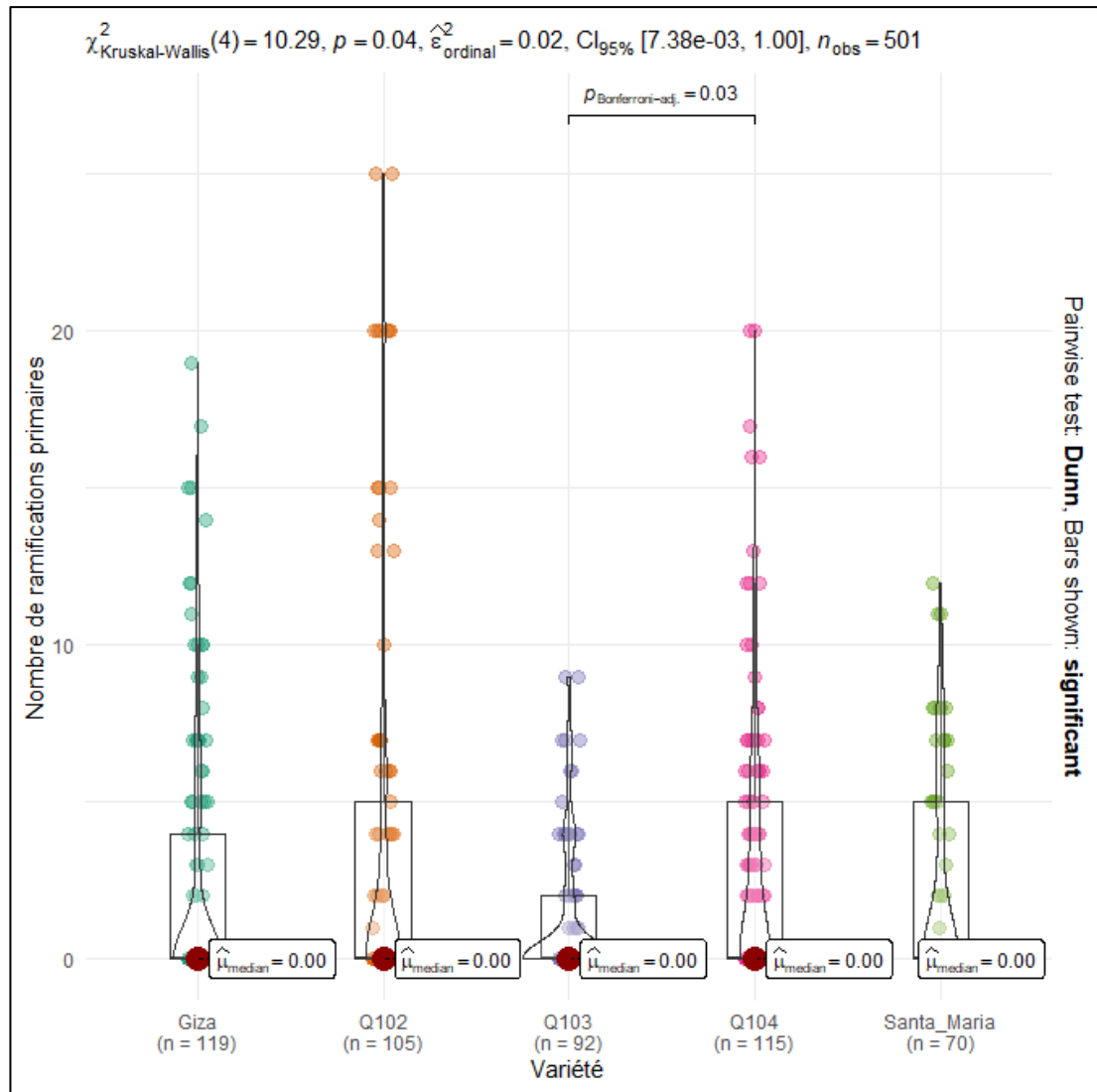


Figure 30 : Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour nombre de ramifications primaires de différents génotypes de quinoa.

5.4. Longueur de panicule

Le test de Kruskal-Wallis a révélé une différence significative entre les génotypes de quinoa en termes de longueur de la panicule ($p\text{-value} = 1.32e-20$). La très faible $p\text{-value}$ indique des différences significatives entre les génotypes. Un test post-hoc est donc nécessaire pour identifier précisément les différences entre elles.

Le test post-hoc de Dunn, avec correction de Bonferroni, a été réalisé pour comparer les variétés entre elles. Il a mis en évidence les différences significatives suivantes :

Comparaison	P.adj (Bonferroni)
Giza - Q103	1.03e-03
Q102 - Q103	1.10e-08
Giza - Q104	7.25e-11
Q102 - Q104	1.02e-18
Q102 - <i>Santa Maria</i>	1.50e-05
Q104- <i>Santa Maria</i>	0.01

Plusieurs comparaisons entre paires de génotypes sont significatives. Les valeurs de p ajustées sont très faibles ($p < 0.05$) indiquant des différences entre les génotypes cités en dessus.

Les groupes homogènes ont été établis sur la base des moyennes de longueur de la panicule :

Génotypes	Moyenne (cm)	Groupe
Q102	16.18	a
Giza	13.05	ab
<i>Santa Maria</i>	10.96	bd
Q103	10.25	cd
Q104	8.97	c

Ont permis de montrer que Q102 appartient au groupe "a" et affiche la plus grande longueur de panicule 16.18 cm. Giza est intermédiaire entre Q102 et les autres génotypes. *Santa Maria*, Q103 et Q104 se situent dans le groupe ayant la plus faible longueur de panicule.

La longueur de la panicule constitue souvent un bon indicateur de rendement, car elle est liée au nombre de fleur ou de grains. Le génotype Q102 semble présenter de bonnes performances, ce qui en fait une variété prometteuse pour les programmes de sélection. Les génotypes Q104, Q103 et *Santa Maria* ont les panicules les plus courtes, ce qui pourrait affecter leur rendement. (Q102 > Giza > *Santa Maria* $\approx$ Q103 > Q104 en termes de longueur de la panicule).

L'analyse du graphique de distribution et du test post-hoc de Dunn confirme les résultats statistiques, les médianes des génotypes montrent une nette séparation entre Q102 et les autres. La dispersion des données est importante pour certaines variétés, notamment Giza et Q102, qui

présentent plusieurs valeurs extrêmes élevées (Figure 31). Les barres de comparaison post-hoc (Dunn) mettent en évidence les différences significatives entre les génotypes.

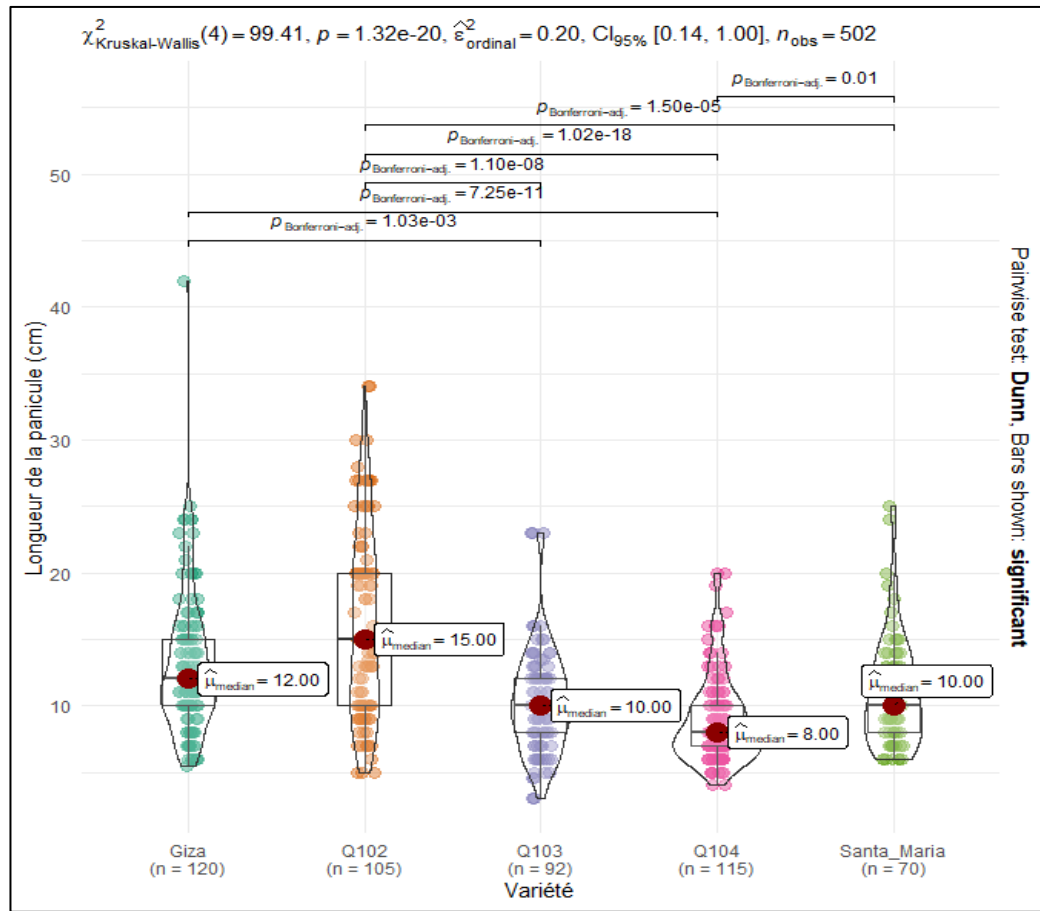


Figure 31 : Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour la longueur de la panicule de différents génotypes de quinoa.

5.5. Diamètre de panicule

Le test de Kruskal-Wallis a révélé une différence significative entre les génotypes de quinoa en termes de diamètre de la panicule, la p-value très faible **1.96e-17** (< 0.05) révèle des différences hautement significatives entre les génotypes. Un test post-hoc est donc nécessaire pour identifier précisément les variétés qui diffèrent significativement.

Le test post-hoc de Dunn, avec correction de Bonferroni, a été Effectué afin de comparer les génotypes entre eux, Q102 indique que le diamètre de panicule significativement plus élevé que toutes les autres variétés. Q103 et *Santa Maria* ne sont pas significativement différentes entre elles. Q104 est plus proche de Giza, mais reste statistiquement différent de autres variétés.

Les groupes homogènes ont été établis sur la base des moyennes du diamètre de la panicule :

Génotypes	Moyenne (cm)	Groupe
Q102	49.31	a
Giza	37.70	b
Q104	38.73	ab
<i>Santa Maria</i>	33.24	c
Q103	32.40	c

Q102 appartient au groupe "a" et affiche le diamètre de panicule le plus large (49.31 cm). Giza et Q104 sont intermédiaires, bien que légèrement différents. *Santa Maria* et Q103 forment le groupe avec les diamètres les plus faibles (33.24 cm 32.40 cm).

L'analyse du graphique de distribution et du test post-hoc de Dunn confirme les résultats statistiques, les médianes montrent une nette séparation entre Q102 par rapport aux autres variétés (Figure 32). La dispersion des données est importante, notamment pour Q102 et Giza, qui présentent plusieurs valeurs extrêmes élevées. Les barres de comparaison post-hoc (Dunn) mettent en évidence les différences significatives entre les génotypes. (Q102 > Q104 ≈ Giza > *Santa Maria* ≈ Q103 en termes de diamètre de la panicule.)

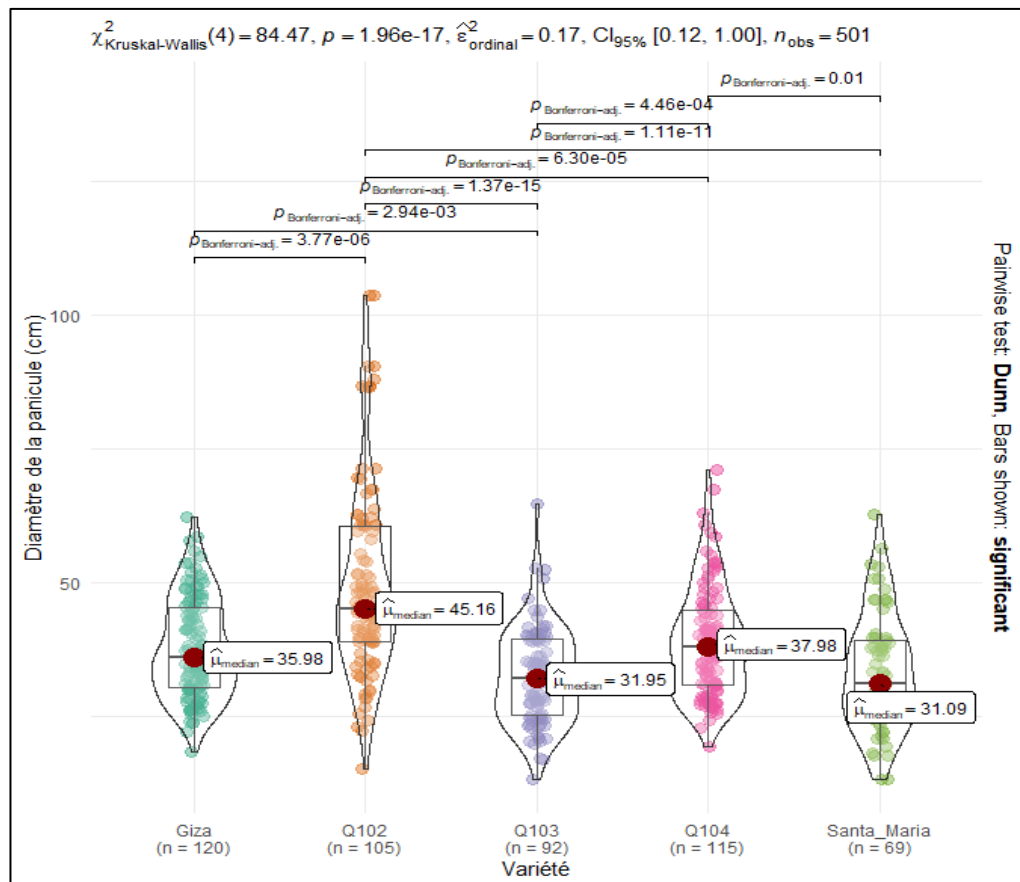


Figure 32 : Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour le diamètre de la panicule de différents génotypes de quinoa.

5.6. Poids de la matière fraîche aérienne

Le test de normalité de Shapiro-Wilk a été appliqué pour chaque génotype de quinoa. Les résultats montrent que tous les génotypes présentent des p-values inférieures à 0.05, indiquant une violation de l'hypothèse de normalité. Par conséquent, un test non paramétrique comme Kruskal-Wallis est plus adapté pour comparer les génotypes.

Le test de Kruskal-Wallis a révélé une différence significative entre les génotypes de quinoa en termes de poids de la matière fraîche aérienne ($p < 2.2e-16$). Cette valeur indique qu'au moins une variété se distingue des autres en termes de biomasse aérienne. Un test post-hoc est nécessaire pour identifier les différences spécifiques entre les génotypes.

Le test post-hoc a été effectué pour identifier les différences spécifiques entre les génotypes. Les comparaisons les plus significatives sont mentionnées sur le graphe en dessous (Figure 33).

Pour les groupes homogènes Q102 se distingue avec le poids de matière fraîche le plus élevé, appartenant au groupe (a) avec une moyenne de 24.99 g.

Génotype	Moyenne (g)	Groupe homogène
Giza	8.40	b
Q102	24.99	a
Q103	2.55	c
Q104	8.11	b
<i>Santa Maria</i>	2.79	c

Q103 et *Santa Maria* forment un groupe distinct (c), affichant les valeurs les plus faibles. Q104 et Giza constituent un groupe intermédiaire (b), indiquant une performance intermédiaire en matière de production de biomasse.

Les médianes montrent une forte disparité entre les variétés, confirmant les résultats du test de Kruskal-Wallis. Q102 a la médiane la plus élevée (6.12 g), tandis que Q103 a la plus faible (1.60 g). La dispersion des données est importante, notamment pour Q102, qui présente des valeurs extrêmes dépassant 600 g, ce qui pourrait indiquer une forte hétérogénéité des individus (Figure 33).

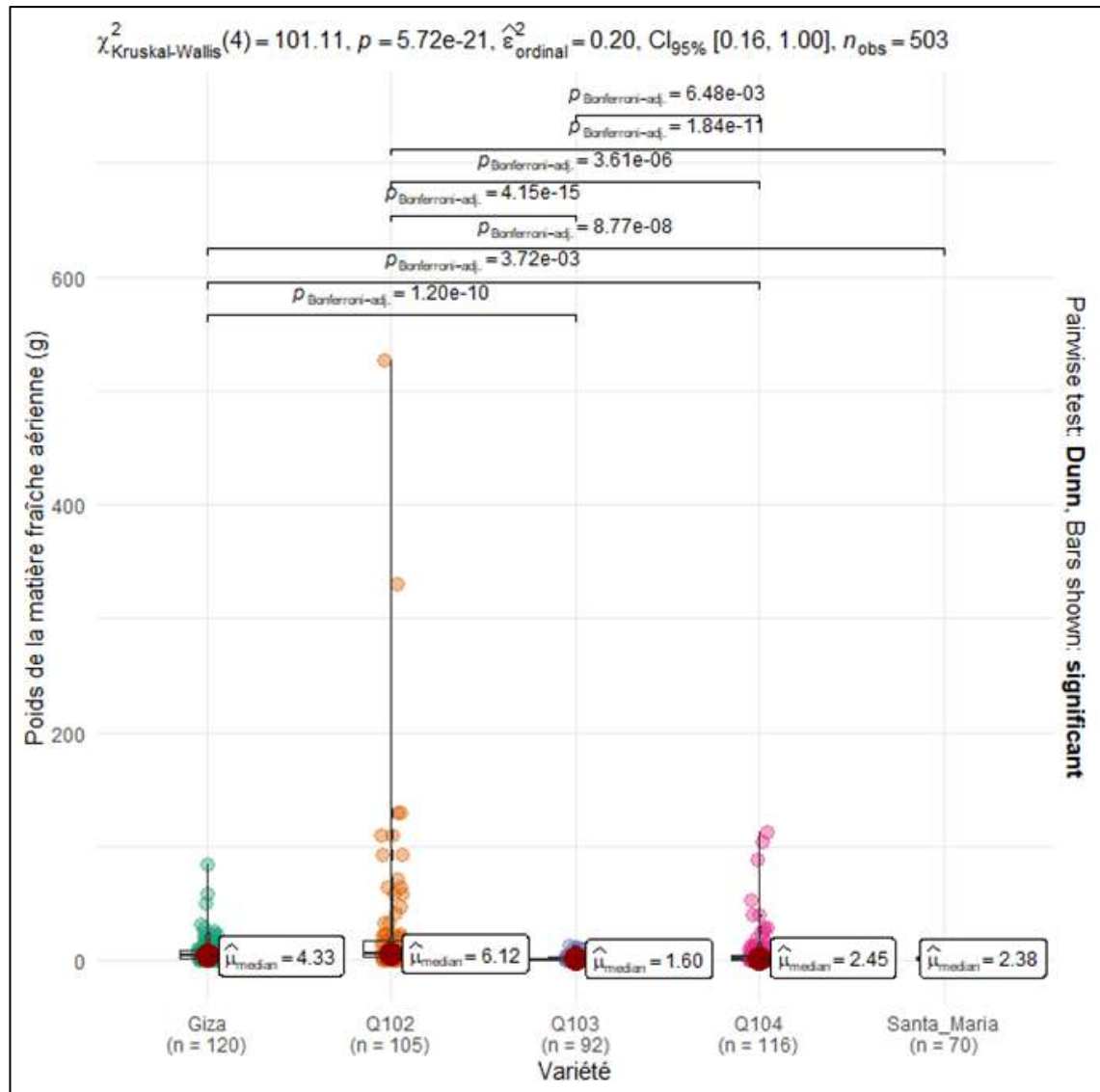


Figure 33 : Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour le poids de la matière Fraîche de différents génotypes de quinoa.

5.7. Poids de la matière sèche aérienne

Le test de normalité de Shapiro-Wilk appliqué à chaque génotype de quinoa. Montrent que toutes les p-values étant inférieures à 0.05, cela indique que l'hypothèse de normalité est rejetée pour tous les génotypes. En conséquence, une approche non paramétrique (test de Kruskal-Wallis) est plus appropriée pour comparer les génotypes.

Le test de **Kruskal-Wallis** a révélé une différence très hautement significative (p-value < 2.2e-16) entre les génotypes de quinoa en termes de poids de la matière sèche aérienne. Il est donc

nécessaire d'identifier quels génotypes diffèrent les uns des autres à l'aide du test post-hoc de Dunn.

Le test **post-hoc de Dunn** a été réalisé avec correction de Bonferroni montre des comparaisons significatives, Q103 présente un poids de matière sèche aérienne significativement plus faible que Q102 et Giza. Q102 affiche la plus forte valeur, se différenciant significativement des autres génotypes. *Santa Maria* et Q104 sont statistiquement similaires, mais se distinguent de Giza et Q102.

Les groupes homogènes ont été établis sur la base des moyennes du poids de la matière sèche aérienne :

Génotype	Moyenne (g)	Groupe
Q102	16.48	a
Giza	6.15	a
Q104	5.16	b
<i>Santa Maria</i>	2.10	b
Q103	1.85	b

- Q102 et Giza forment un groupe homogène "a", ayant les valeurs les plus élevées. Q102 présente le meilleur potentiel de production de matière sèche aérienne, ce qui pourrait être intéressant pour une culture destinée à la biomasse. Alors que Q103, Q104 et *Santa Maria* sont classées dans le groupe "b", indiquant des poids significativement plus faibles.

L'analyse du graphique (Figure 34) confirme les résultats statistiques :

- Les médianes des variétés indiquent une nette séparation entre Q102/Giza et les autres. La dispersion des données montre une variabilité importante dans certaines variétés, notamment Q102, qui présente quelques valeurs extrêmes très élevées.
- Les barres de comparaison post-hoc (Dunn) mettent en évidence les différences significatives.

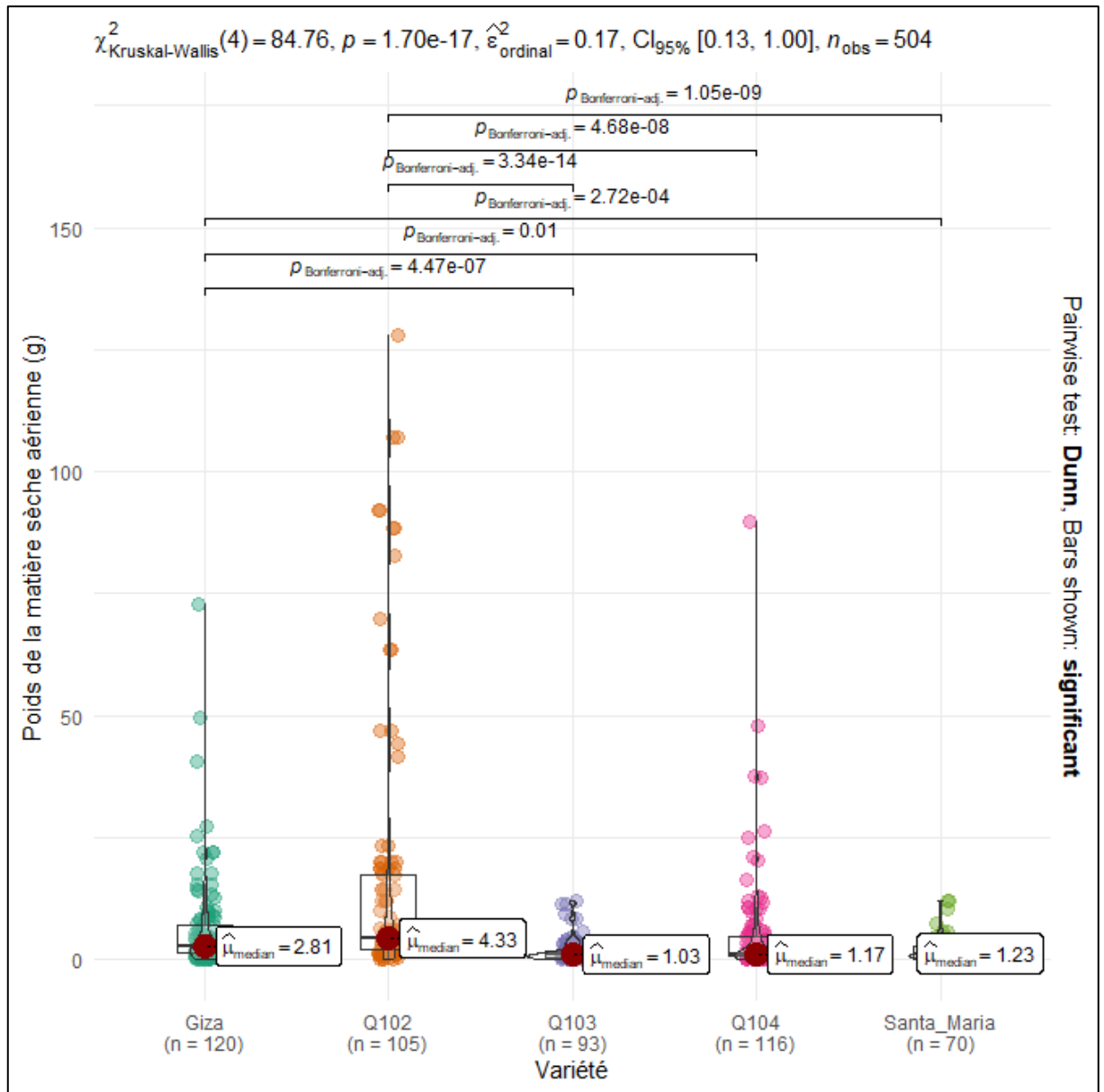


Figure 34 : Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour le poids de la matière sèche de différents génotypes de quinoa.

5.8. Nombre de panicule par plante

Les résultats de test de normalité de **Shapiro-Wilk** montrent que certaines variétés ne suivent pas une distribution normale, la plupart des p-values sont inférieures à 0.05, sauf pour Santa Maria. Cela implique que les données ne suivent pas une distribution normale pour la majorité des génotypes. Par conséquent, le test de Kruskal-Wallis est utilisé pour comparer les génotypes.

Le test de **Kruskal-Wallis** a révélé des différences significatives entre les génotypes de quinoa concernant le nombre de panicules par plante, **p-value** = 9.97e-06, très faible (< 0.05). Un test post-hoc de Dunn a donc été effectué pour identifier ces différences.

Le test de Dunn, corrigé par Bonferroni, a permis de comparer les génotypes entre eux :

Comparaison	P.adj
Giza - Q102	9.19e-05
Giza - Q103	2.15e-03
Q102 - Q104	2.96e-03
Q103 - Q104	0.04

Le génotype Giza présente un nombre de panicules par plante significativement plus élevé que les génotypes Q102 et Q103. Q102 a un nombre de panicules significativement inférieur à Q104, *Santa Maria* ne montre pas de différence significative avec la plupart des autres variétés.

Les groupes homogènes qui ont été établis en fonction des moyennes indique que :

Génotype	Moyenne	Groupe
Giza	7.44	a
Q104	6.31	a
<i>Santa Maria</i>	5.13	b
Q102	5.45	ab
Q103	4.37	b

Giza et Q104 constituent le groupe (a) ayant le nombre de panicules par plante le plus élevé avec une moyenne de 7,44 et 6,31 respectivement. *Santa Maria* et Q103 ont un nombre significativement inférieur de panicules par plante ($Giza \approx Q104 > Santa Maria > Q102 \approx Q103$ en termes de nombre de panicules par plante).

Le graphique montre (Figure 35) que les médianes sont distinctes pour certaines variétés, notamment Giza et Q104, qui ont les valeurs les plus élevées. La dispersion est plus importante chez certains génotypes, tels que Q102, ce qui reflète une variabilité élevée au sein de ce génotype.

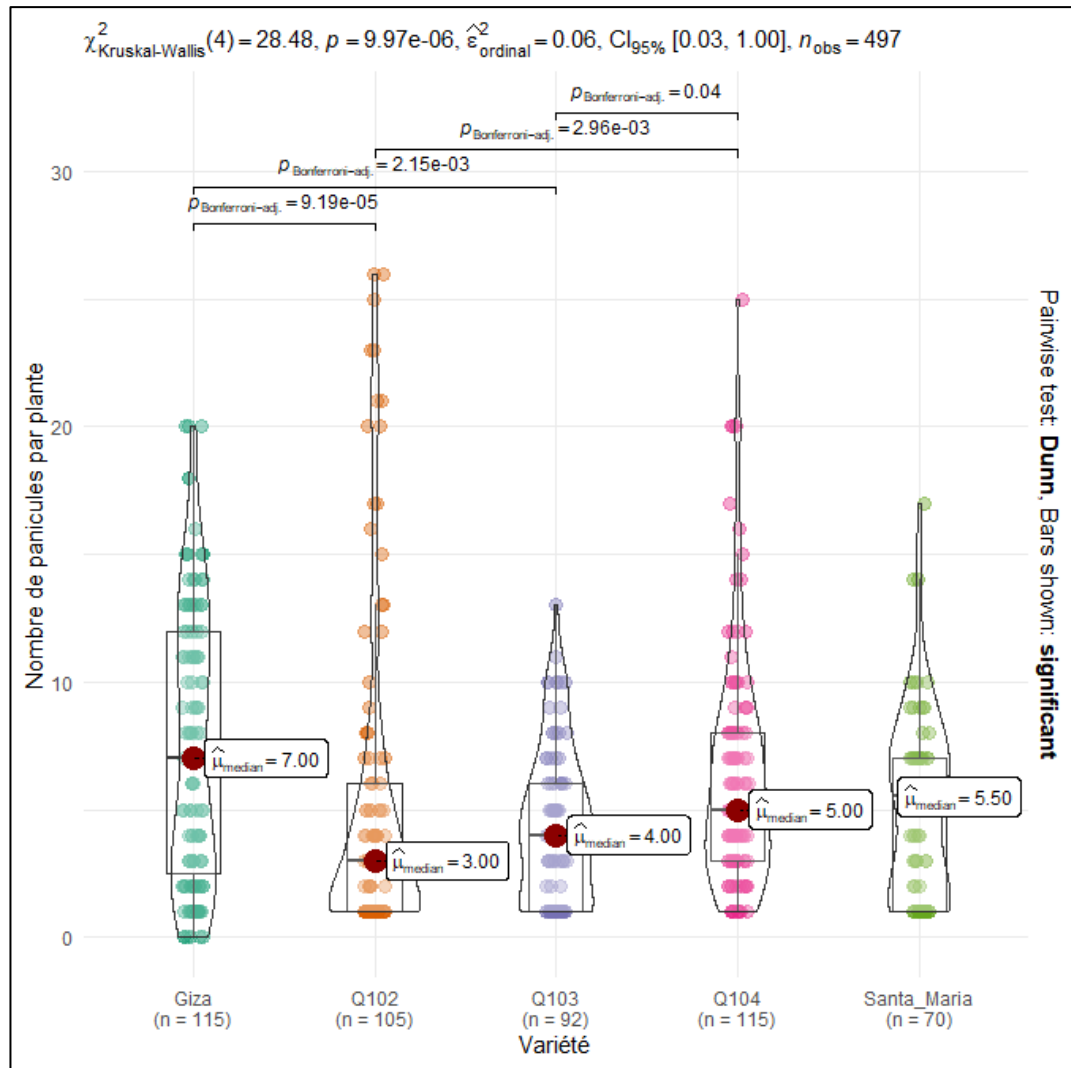


Figure 35 : Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour le nombre de panicules par plante de différents génotypes de quinoa.

5.9. Indice de récolte

Le test de normalité **Shapiro-Wilk** appliqué aux données a montré que tous les génotypes n'ont pas une distribution normale, elles présentent des p-values inférieures à 0.05, indiquant une absence de normalité des données. Par conséquent, le test de Kruskal-Wallis est requis.

Le test de **Kruskal-Wallis** a révélé des différences significatives entre les génotypes p-value = 4.22e-09 ($p < 0.05$), la p-value extrêmement faible confirme l'existence de différences

significatives entre les génotypes pour l'indice de récolte. Le test post-hoc de Dunn est nécessaire pour préciser ces différences.

Les comparaisons avec post-hoc (Dunn) correction de Bonferroni montrent les résultats suivants :

Comparaison	P.adj
Giza - Q103	5.23e-03
Q102 - Q103	1.25e-07
Q102 - Q104	3.04e-02
Giza - <i>Santa Maria</i>	1.14e-02
Q102 - <i>Santa Maria</i>	1.06e-06

Les variétés Q102 présente un indice de récolte significativement inférieurs par rapport à d'autres variétés comme Giza et *Santa Maria*.

Les groupes homogènes qui ont été établis en fonction des moyennes indique que :

Génotypes	Moyenne	Groupe
Giza	0.673	cd
Q102	0.619	c
Q103	0.735	ab
Q104	0.683	b
<i>Santa Maria</i>	0.742	a

Les génotypes Giza et Q104 et Q103 se positionnent dans des groupes intermédiaires différents, tandis que Q102 forme un groupe homogène (c) et *Santa Maria* un autre groupe homogène (a) affichant un indice de récolte le plus élevé.

Le graphique met en évidence les médianes distinctes pour les différents génotypes. Les barres indiquant les comparaisons significatives confirment les résultats du test de Dunn. La dispersion des données varie d'une variété à l'autre, reflétant une hétérogénéité interne.

Les résultats montrent que l'indice de récolte est fortement influencé par le génotype de quinoa. Les génotypes *Santa Maria* et Q103 affichent des indices de récolte élevés, ce qui peut refléter un meilleur rendement.

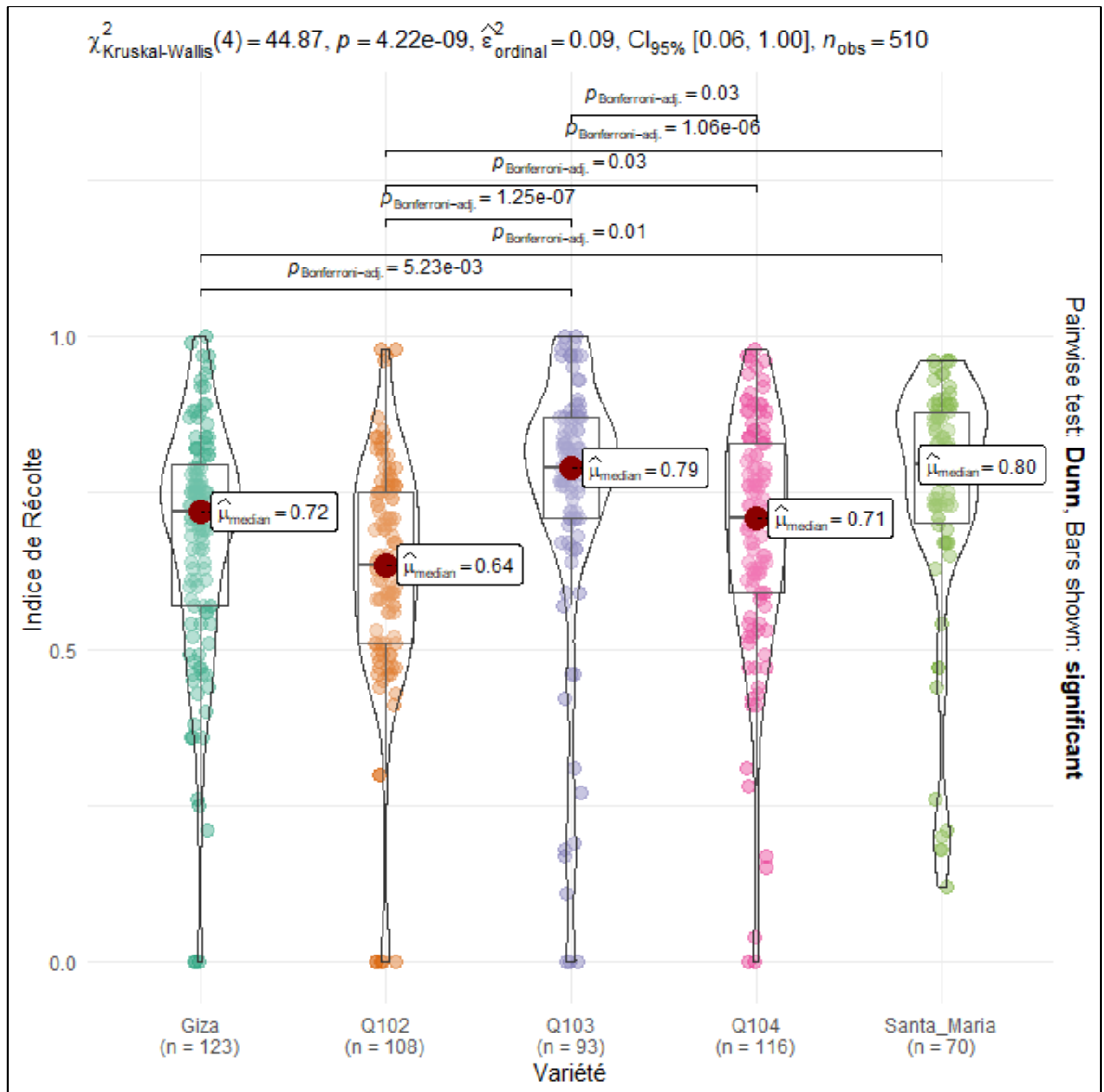


Figure 36 : Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour l'indice de récolte de différentes variétés de quinoa.

5.10. Nombre des dents par feuille

Le test de normalité Shapiro-Wilk appliqué aux données a montré que toutes les variétés ont une distribution normale sauf Q103, par conséquent, le test de Kruskal-Wallis est nécessaire

Le test Kruskal-Wallis montre qu'il existe des différences significatives ($p=1.54 \times 10^{-5}$) entre les génotypes concernant le nombre de dents par feuille.

Les analyses post-hoc de Dunn, avec une correction de Bonferroni, ont révélé des différences significatives ($p < 0.05$) lors des comparaisons paires, comme le montre le

graphique (Figure 37). Les autres comparaisons ne montrent pas de différences significatives ($p_{adj} > 0.05$).

Pour les groupes homogènes ;

Génotypes	Moyenne	Groupe homogène
Giza	11.45	a
Q102	10.38	ab
Q103	9.00	b
Q104	11.49	a
<i>Santa Maria</i>	9.20	b

Les génotypes Giza et Q104 appartiennent au groupe (a) avec des valeurs moyennes 11,45 et 11,49 dents/feuille respectivement, tandis que Q103 et *Santa_Maria* forme un groupe inférieur (b) et Q102 se positionne entre les deux groupes.

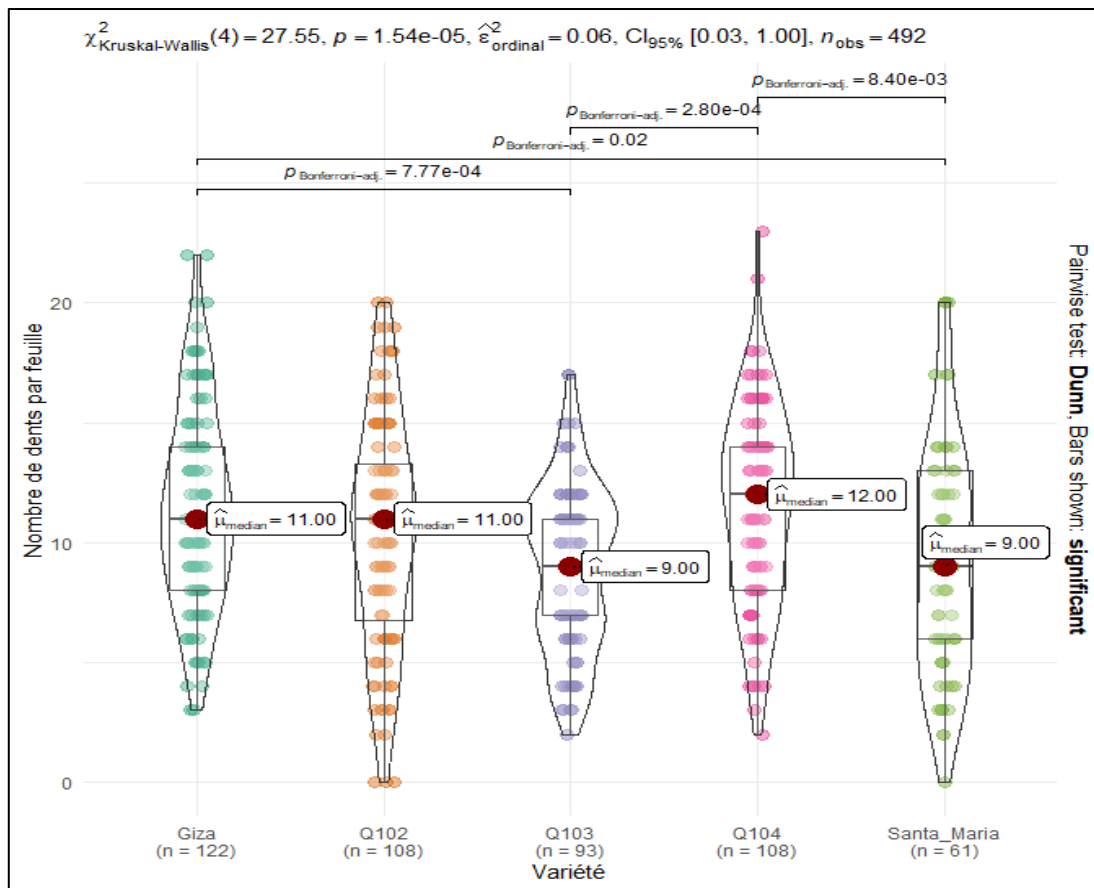


Figure 37 : Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour nombre de dents par feuille de différents génotypes de quinoa.

5.11. Longueur pétiole

Le test de Kruskal-Wallis met en évidence des différences significatives statistiquement entre les génotypes en ce qui concerne la longueur du pétiole $p\text{-value} = 8.7e-10$ ($p < 0.05$).

Les comparaisons multiples (test post-hoc de Dunn avec correction de Bonferroni) montrent des différences très significatives identifiées sur le graphique ($p < 0.001$) (Figure 38).

Les groupes homogènes et moyenne :

Génotypes	Moyenne	Groupes homogènes
Giza	34,40	b
Q102	40,53	a
Q103	28,60	c
Q104	32,32	bc
<i>Santa Maria</i>	30,90	bc

Le pétiole relie la feuille à la tige et joue plusieurs rôles tel que le transport de la sève et la flexibilité mécanique (résistance au vent), Longueur de pétiole la plus élevée est chez Q102 avec 40,53 mm, elle forme le premier groupe homogènes (a) traduit par une meilleure exposition des feuilles, ce qui risque la fragilité mécanique (vent, cassure). La longueur du pétiole la plus faible est de Q103 (28. 60 mm) (c), ce qui confère une résistance, compacité de la plante, potentiellement plus résistante au vent.

Giza, Q104 et *Santa Maria* possèdent une longueur intermédiaire (34.40 mm, 32,32 mm, 30,90 mm), Bon compromis entre exposition solaire et résistance mécanique.

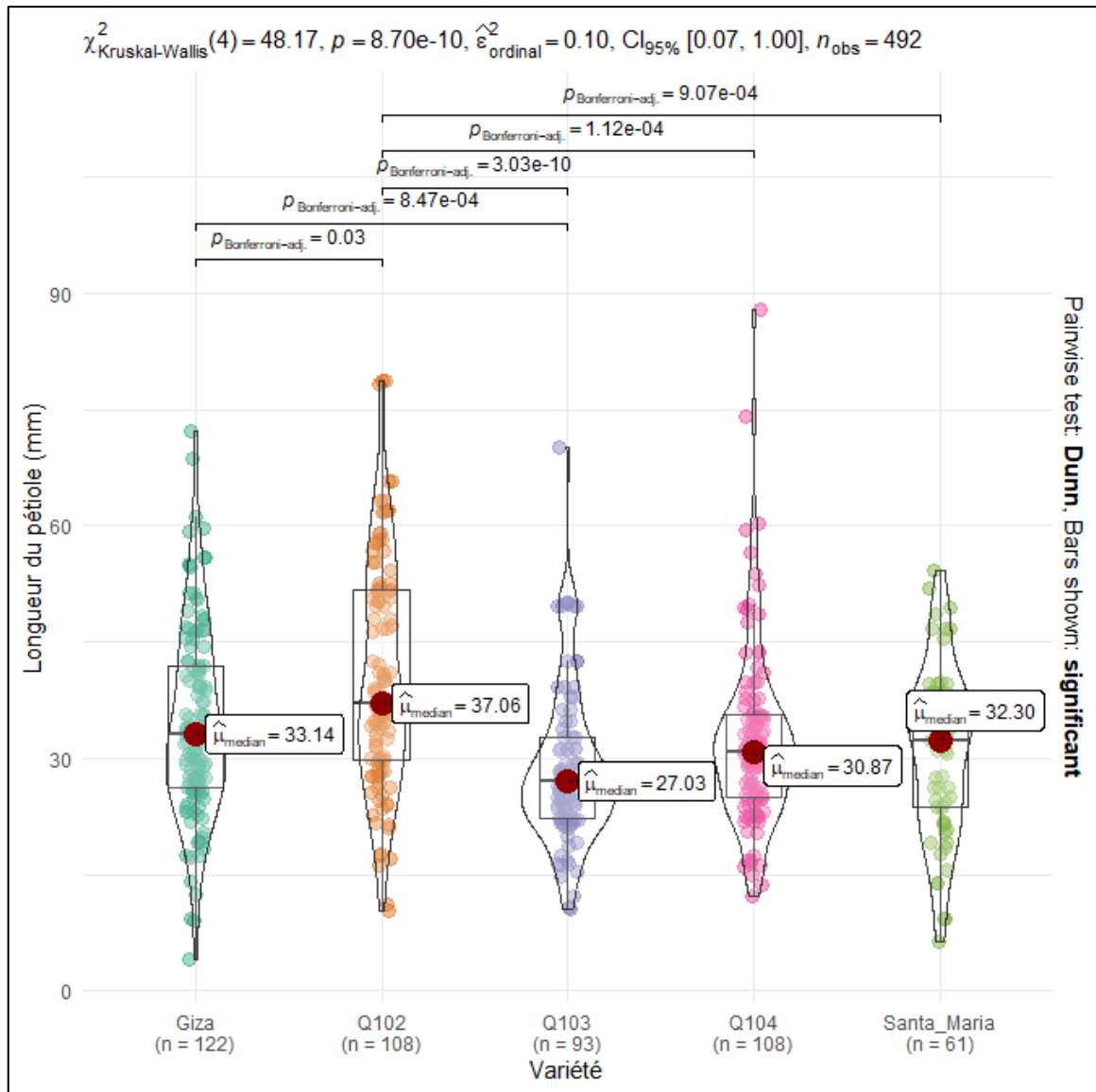


Figure 38 : Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour la longueur du pétiole de différents génotypes de quinoa.

5.12. Longueur maximale des feuilles

Selon le test de Kruskal-Wallis ($p=2.94 \times 10^{-34}$) Il existe des différences très hautement significatives entre les génotypes concernant la longueur maximale des feuilles.

Les comparaisons post-hoc montrent que les p-values sont extrêmement faibles, indiquant des différences statistiquement très significatives (Figure 39).

Les groupes homogènes et moyenne

Génotypes	Moyenne	Groupes homogènes
- Giza	61.81	a
- Q102	62.95	a
- Q103	40.96	c
- Q104	53.47	b
- <i>Santa_Maria</i>	40.81	c

Trois groupes homogènes se forment répartissant ainsi les génotypes Giza et Q102 dans le groupe (a) possédant des longueurs (61.81 et 62.95 mm). Q103 et *Santa Maria* dans le groupe (c) et enfin Q104 constitue le dernier groupe (b) avec une longueur (53. 47 mm).

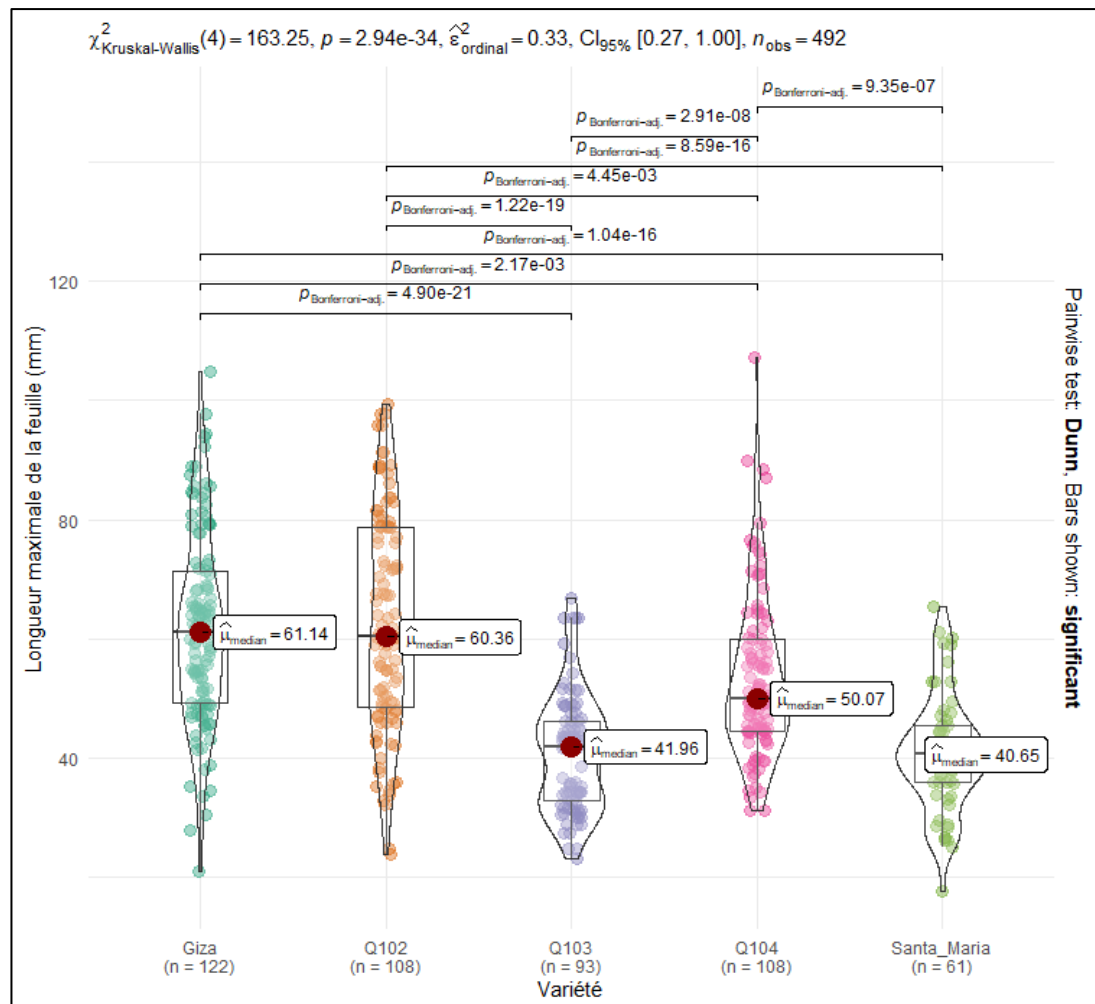


Figure 39 : Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour la longueur maximale de la feuille(mm) de différents génotypes de quinoa.

5.13. Largeur max des feuilles

Le test de Kruskal-Wallis montre qu'il y a des différences statistiquement significatives entre les génotypes pour la largeur maximale de la feuille ($p\text{-value}=4.46\times 10^{-21}$). Il est important de passer au test de post-hoc.

Les comparaisons post-hoc montrent que certaines paires de génotypes présentent des différences statistiquement significatives.

Comparison	p (ajusté)	Significatif
Q102 vs Q103	5.29e-16	Très fort
Q102 vs Q104	1.77e-03	Modéré
Q102 vs <i>Santa_Maria</i>	2.06e-11	Tres fort
Q104 vs <i>Santa_Maria</i>	1.21e-03	Modéré
Giza vs Q103	1.02e-10	Tres Fort
Giza vs <i>Santa_Maria</i>	2.23e-07	Fort
Q104 vs Q103	1.81e-05	Fort

D'autres comparaisons (par exemple, Giza - Q102 et Q103 - *Santa_Maria*) ne sont pas significatives ($p_{\text{adj}} > 0.05$).

L'analyse des groupes homogènes indique que Q102 présente la plus grandes largeurs moyennes des feuilles avec 52,78 mm et forme le groupe (a), suivis par Giza (48,63 mm) qui forme un groupe intermédiaire (ab), ces variétés sont les plus performantes en termes de surface foliaire

Génotype	Moyenne de largeur feuille (mm)	Groupes
Q102	52.78 mm (plus large)	a
Giza	48.63 mm	ab
Q104	45.47 mm	b
<i>Santa_Maria</i>	36.59 mm	c
Q103	35.78 mm (plus étroite)	c

Par contre Q103 et *Santa Maria* ont une Largeurs significativement plus faibles avec 35.78 mm et 36.59 mm de moyenne, elles composent le groupe (c).

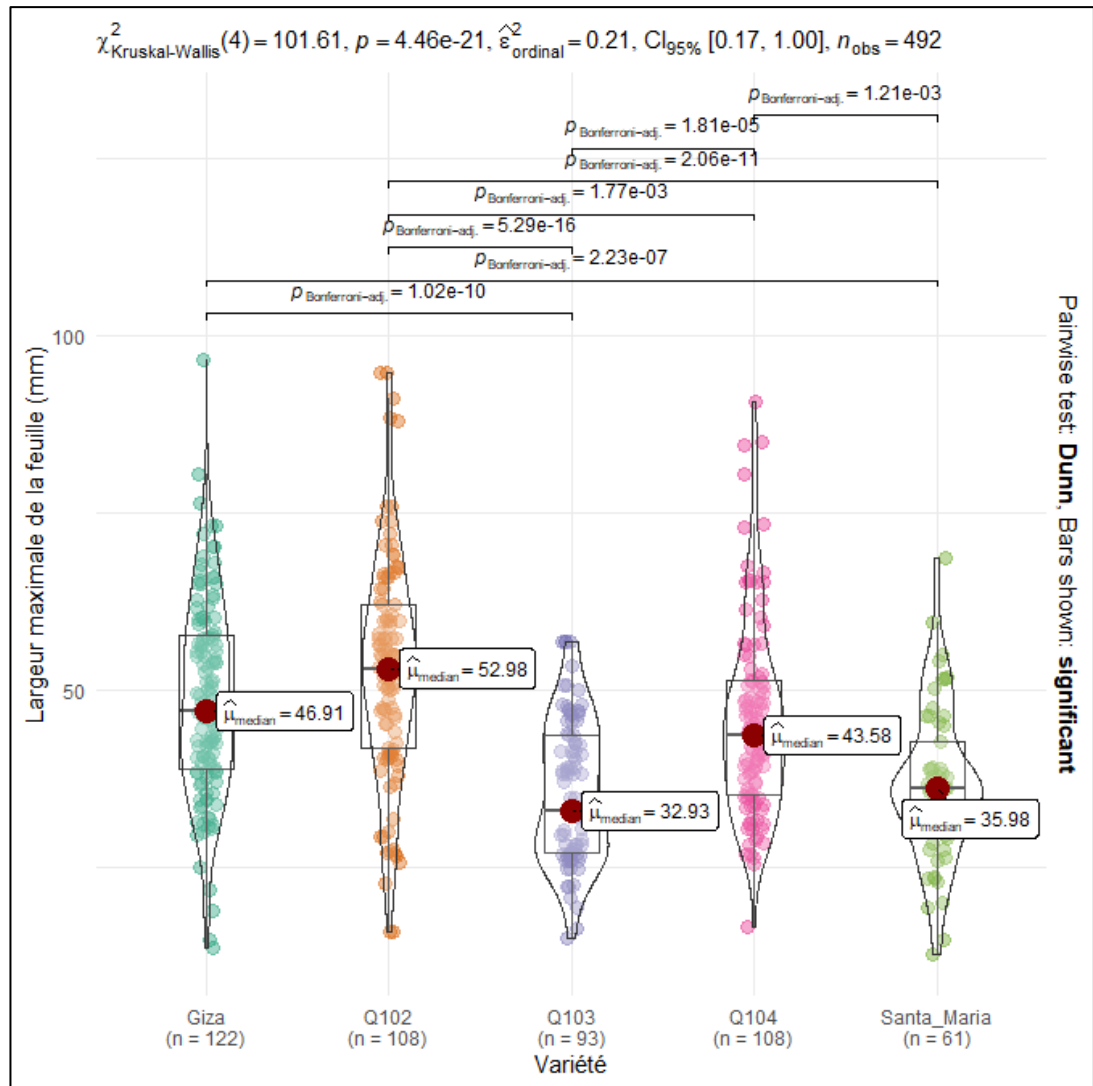


Figure 40 : Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour largeur maximale de la feuille(mm) de différents génotypes de quinoa.

5.14. Rendement en grains par plante

Le test de normalité de Shapiro-Wilk montre que toutes les p-values sont inférieures à 0.05, l'hypothèse de normalité est rejetée pour tous les génotypes. En conséquence, une approche non paramétrique, comme le test de Kruskal-Wallis, est plus appropriée pour comparer les génotypes.

Ce test a révélé une différence significative entre les génotypes de quinoa en termes de production par plante p-value = 6.60e-11, la très faible p-value indique des différences hautement significatives entre les variétés. Un test post-hoc est donc nécessaire pour identifier précisément les différences entre elles.

Le test post-hoc de Dunn, avec correction de Bonferroni, a été réalisé pour comparer les génotypes entre elles. Les résultats montrent les différences significatives suivantes :

Comparaison	P.adj (Bonferroni)
Giza - Q103	8.93e-04
Q102 - Q103	4.28e-08
Giza - Q104	1.70e-03
Q102 - Q104	5.90e-08
Q102 - <i>Santa Maria</i>	8.27e-05

Q102 présente une production plus élevée par rapport aux autres génotypes. Giza diffère significativement de Q104 et Q103, qui a la plus faible production. *Santa Maria* et Q104 d'une part, d'autre part Q103 et Q104 ne sont pas significativement différents entre eux.

- Les groupes homogènes ont été établis sur la base des moyennes de production par plante :

Génotypes	Moyenne (g)	Groupe
Q102	20.73	a
Giza	11.01	ab
<i>Santa Maria</i>	7.23	c
Q103	5.42	c
Q104	8.68	c

Il montre que Q102 appartient au groupe "a" et affiche la production la plus élevée 20.73g. Giza est intermédiaire entre Q102 et les autres variétés elle constitue le groupe (ab). Q103, Q104 et *Santa Maria* se situent dans les groupes ayant la plus faible production.

La dispersion des données est importante pour certaines variétés, notamment Q102, qui présente plusieurs valeurs extrêmes élevées (Figure 41).

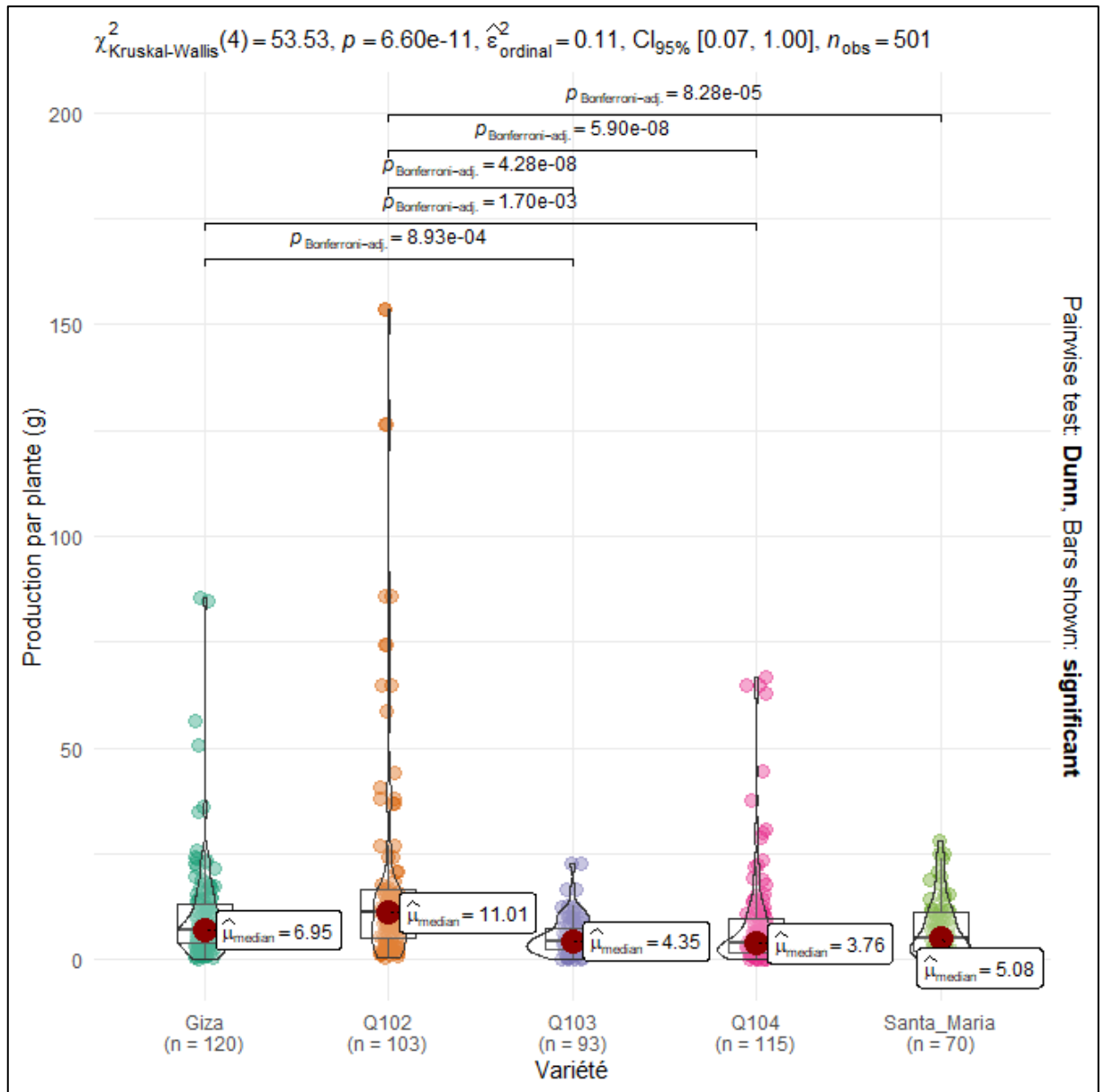


Figure 41 : Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour la production par plante (g) de différents génotypes de quinoa.

5.15. Poids de mille grains

Les résultats du test (**Shapiro-Wilk**) montrent que les données de PMG ne suivent pas une distribution normale pour les cinq variétés étudiées. Les p-values associées sont toutes inférieures à 0,05, confirmant que les données sont non normales. Par conséquent, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été nécessaire.

La statistique de test **Kruskal-Wallis** est très significative, **p-value** : 6,29e-59 (extrêmement significative, $p < 0,05$), ce résultat indique des différences importantes entre les variétés en termes de PMG.

L'analyse des comparaisons multiples (Test de Dunn avec correction Bonferroni) a identifié plusieurs différences statistiquement significatives, les différences entre Q104 et Q103 sont hautement significatives ($p < 3,19\text{e-}37$), de même que celles entre Q104 et Santa Maria ($p < 8,65\text{e-}35$). En revanche, aucune différence significative n'a été observée entre les variétés Q104 et Giza, ce qui se traduit par leur classement commun dans le groupe homogène(c).

Les variétés ont été classées en groupes homogènes en fonction de leur PMG moyen.

Génotypes	Moyenne (g)	Groupe homogène
Giza	3,40	c
Q102	3,62	b
Q103	4,10	a
Q104	3,20	c
<i>Santa Maria</i>	4,05	a

Trois groupes homogènes sont formés : Q103 et *Santa Maria* se distinguent avec des PMG significativement plus élevés, et partagent le même groupe homogène "a", Q102 et forme le groupe « b » tandis que les variétés Giza et Q104 partagent le même groupe homogène "c"

La moyenne de la variété Q103 est la plus élevée, située à 4,10 g. Le génotype *Santa Maria* a également un PMG élevé, avec une moyenne de 4,05 g. À l'inverse, les génotypes Giza (3,40 g) et Q104 (3,20 g) présentent des PMG nettement plus faibles (Figure 42).

Q103, bien que proche de *Santa Maria* en termes de moyenne, présente une variabilité légèrement plus élevée, signalant une hétérogénéité dans la taille des grains. Les génotypes Giza et Q102 montrent une dispersion modérée,

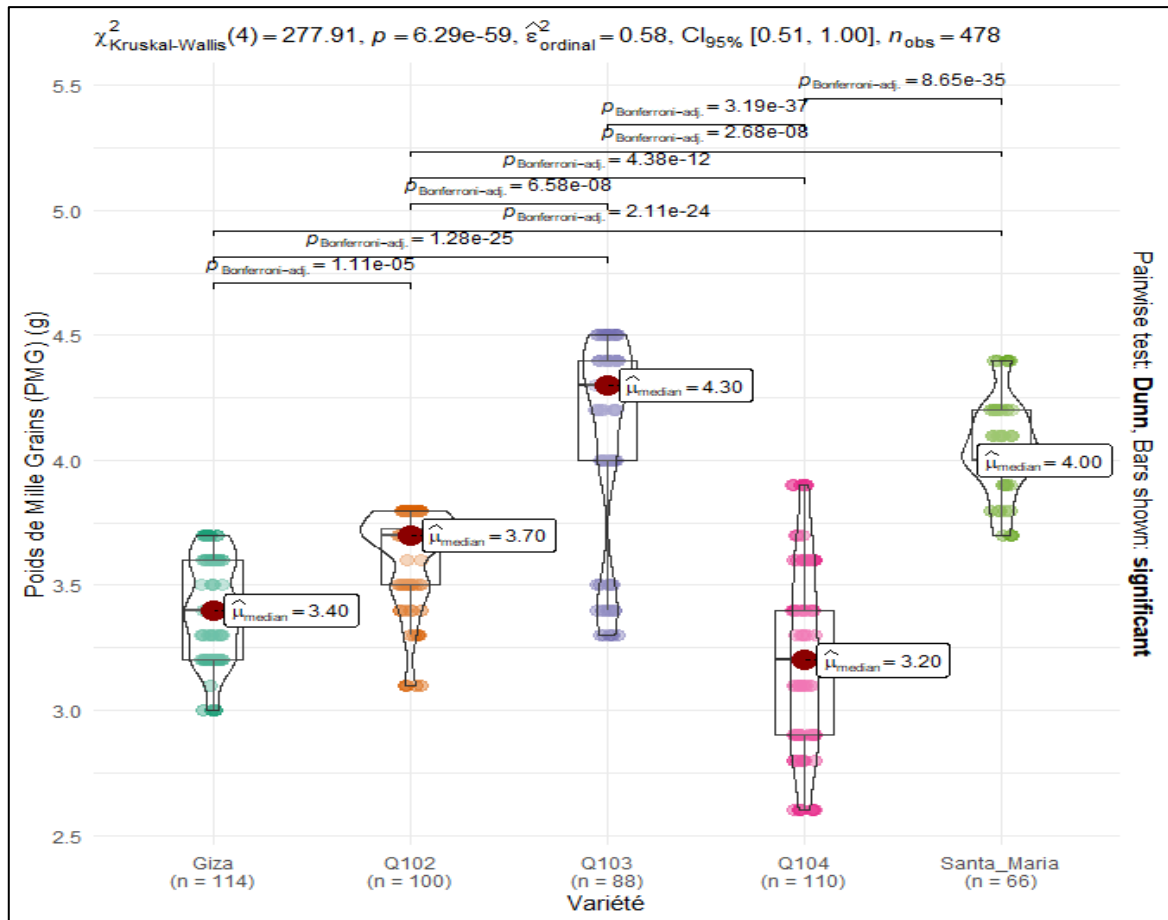


Figure 42 : Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour le poids de mille grains (PMG) (g) de différents génotypes de quinoa.

5.16. Diamètre de grains

Le test de normalité a montré que les données du diamètre de la graine ne suivent pas une distribution normale pour les cinq variétés. Toutes les p-values sont inférieures à 0,05, confirmant que les distributions des données par variété sont non normales. En conséquence, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis est nécessaire.

Le test Kruskal-Wallis indique qu'il existe des différences statistiquement significatives, p-value : 4,18e-24 (très significative, $p < 0,05$) entre les génotypes en ce qui concerne le diamètre de la graine.

Les résultats du test post-hoc de Dunn avec correction Bonferroni montrent les différences mentionnées dans la figure 43

Les comparaisons entre certains génotypes, comme Giza et Q102, ainsi que Q102 et Q104, sont très significatives. Ces résultats soulignent des différences marquées dans les diamètres moyens des graines entre certains génotypes.

Génotypes	Moyenne (mm)	Groupe homogène
Giza	2,084	c
Q102	2,278	a
Q103	2,182	b
Q104	2,081	c
<i>Santa Maria</i>	2,200	ab

Les génotypes Giza et Q104 ont des diamètres similaires (environ 2,08 mm) et partagent le même groupe homogène "c", indiquant qu'elles n'ont pas de différence statistiquement significative en termes de diamètre moyen des graines. En revanche, Q102 présente un diamètre de graine significativement plus élevé avec une moyenne (2,28 mm), et forme un groupe distinct "a". Le génotype *Santa Maria* se situe dans un groupe intermédiaire "ab". Q104 montre une dispersion importante des données, suggérant une variabilité génétique plus forte

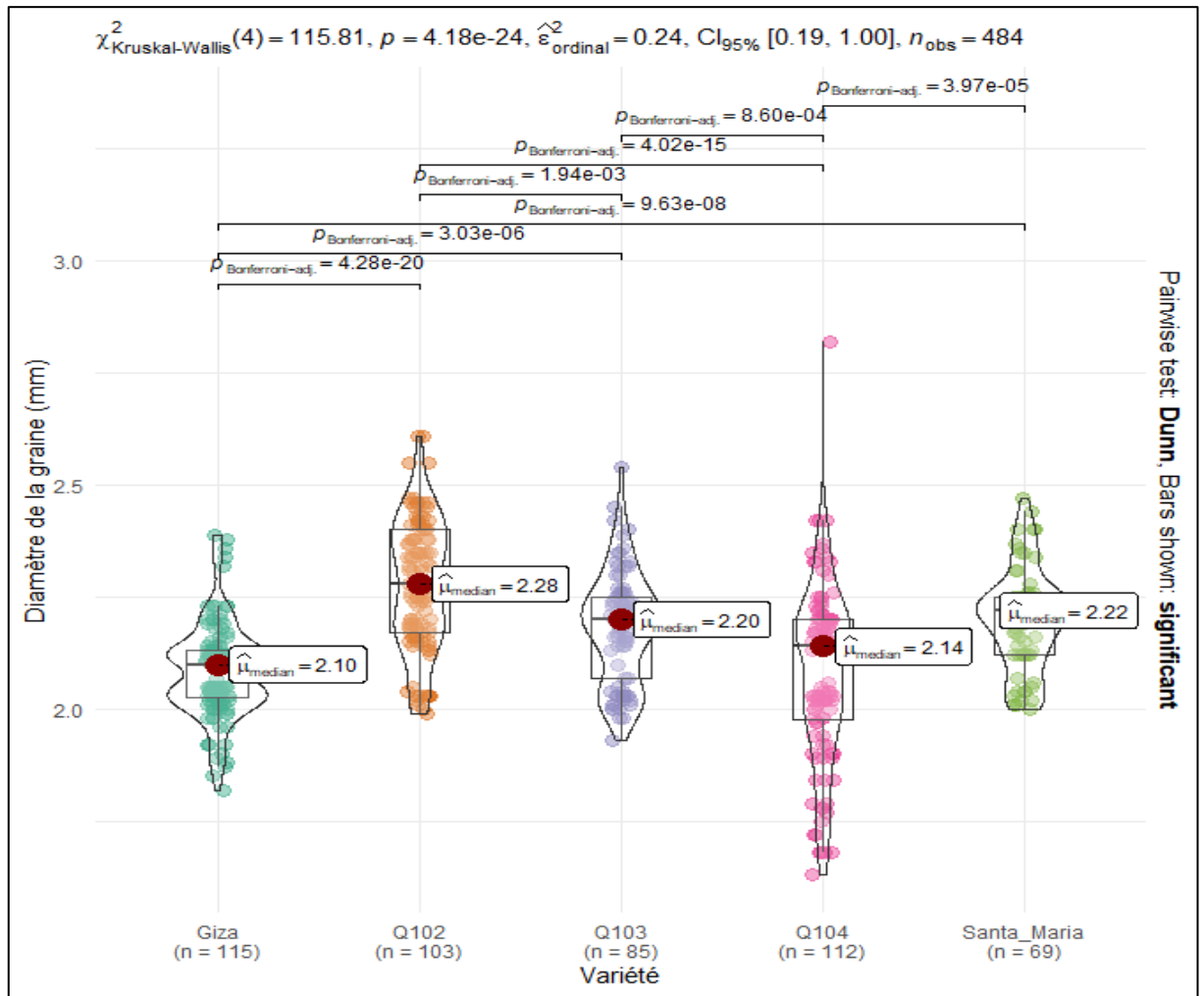


Figure 43 : Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour le diamètre de grains (mm) de différents génotypes de quinoa.

5.17. Epaisseur de grains

Le test de normalité a révélé que certains génotypes suivent une distribution normale (Q103, Q104, *Santa Maria*), tandis que d'autres ne la suivent pas (Giza et Q102) :

Les génotypes Giza et Q102 présentent des p-values inférieures à 0,05, indiquant une absence de normalité. En conséquence, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été appliqué pour l'analyse des différences entre les génotypes.

Les résultats du test de Kruskal-Wallis indiquent des différences statistiquement significatives p-value = 1.54e-31 (très significative, $p < 0.05$) entre les génotypes pour l'épaisseur moyenne des grains.

Le test post-hoc de Dunn a permis d'explorer les comparaisons entre les génotypes. Les résultats montrent des différences très significatives entre certains génotypes, notamment entre Q102 et *Santa Maria*, ainsi que Q102 et Q103

Génotypes	Moyenne (mm)	Groupe homogène
Giza	1.2099	b
Q102	1.1236	c
Q103	1.2974	a
Q104	1.2200	b
<i>Santa Maria</i>	1.3570	a

Les génotypes Giza et Q104 font partie du même groupe homogène "b", tandis que Q103 et *Santa Maria* se distinguent avec des valeurs significativement plus élevées, ce qui peut expliquer leur appartenance au même groupe homogène statistique "a". Q102 forme le groupe (c) avec une valeur moyenne de 1.12 mm.

Santa Maria et Giza montrent une large dispersion autour de la médiane. Cela suggère une forte variabilité génétique. À l'inverse, les graines de la variété Q102 ont une distribution plus resserrée, indiquant une meilleure uniformité.

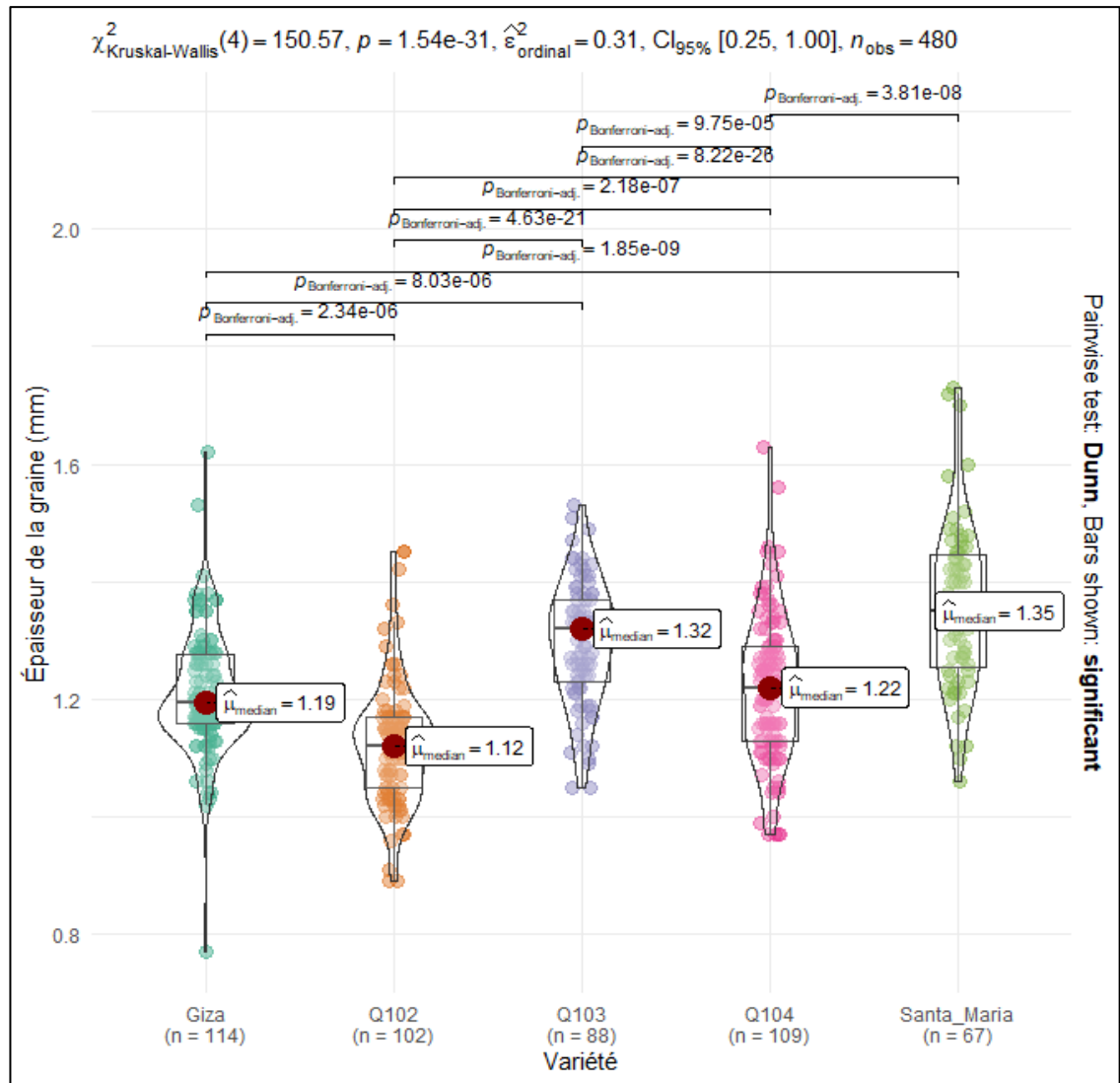


Figure 44 : Diagramme en violon combiné avec des Boxplots, pour l'épaisseur de grains (mm) de différents génotypes de quinoa.

6. Caractérisation agro morphologique des variables qualitatives

6.1. Présence ou absence des ramifications

○ Fréquences par présence ou absence de ramifications

Les données montrent deux catégories :

- **Absent** : 327 observations (environ 64% du total).
- **Présent** : 181 observations (environ 36% du total).

Les observations indiquent une majorité de plantes sans ramifications.

Analyse statistique du test χ^2 (Chi-squared test) montre une p-value inférieure à 0,05, (p-value : 0,02476), confirmant une différence statistiquement significative entre les variétés concernant la présence ou l'absence de ramifications.

Cela indique que cette caractéristique n'est pas répartie de manière aléatoire parmi les variétés et pourrait être influencée par des facteurs génétiques.

Le graphique montre des variations notables selon les génotypes :

- **Giza, Q102, et Q103** : une forte proportion (67-70%) de plantes sans ramifications.
- **Q104** : environ 52% des plantes sont sans ramifications, montrant un meilleur équilibre entre les deux états.
- **Santa Maria** : 63% de panicules sans ramifications.

Ces différences suggèrent une variabilité inter-variétale dans le développement des ramifications.

La valeur de **Cramer V 0,12** indique une faible association entre le génotype et la présence ou l'absence de ramifications. Bien que l'association soit statistiquement significative, la force pratique de cette association pourrait être limitée (Figure 45).

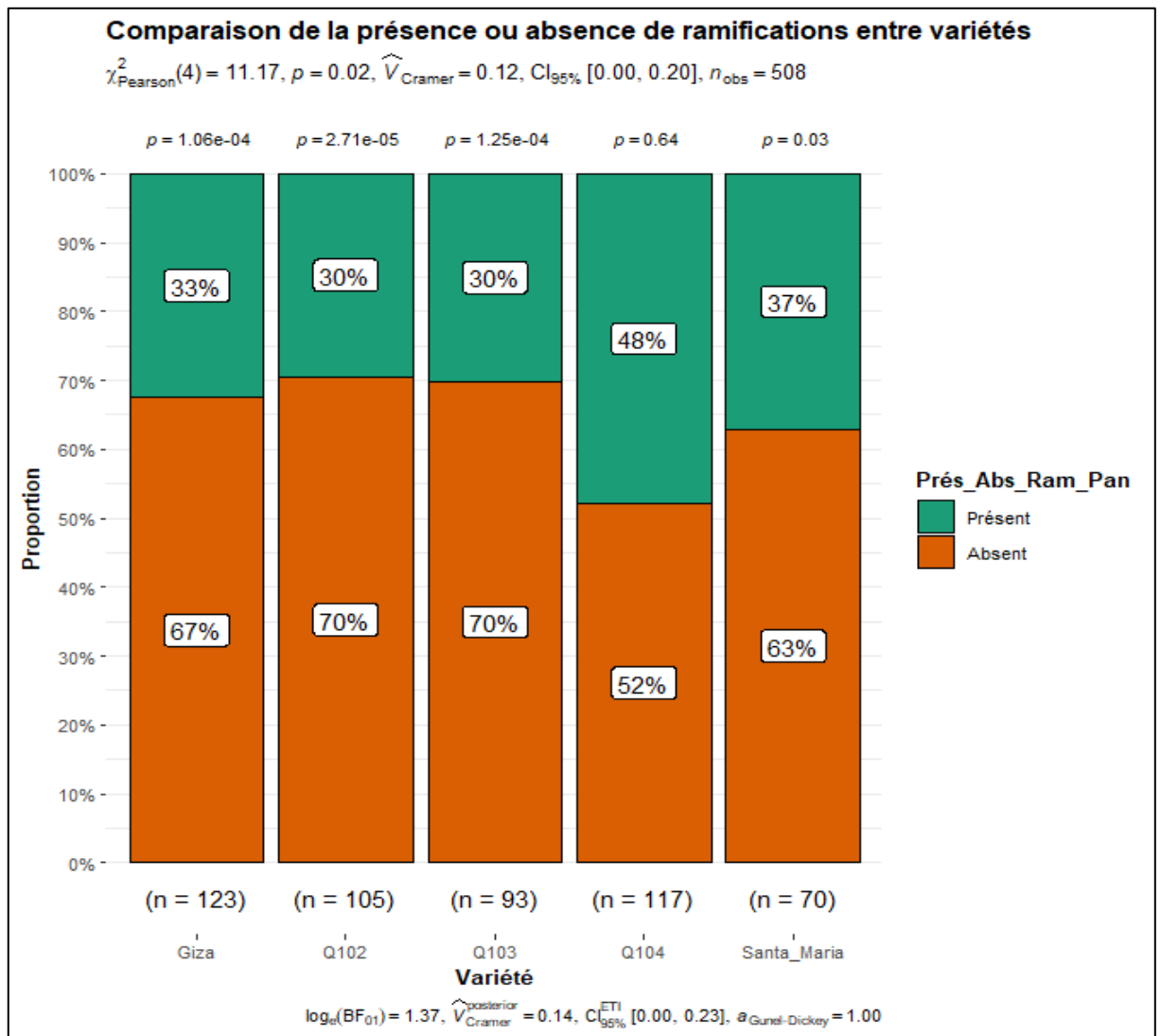


Figure 45 : Comparaison de la présence ou absence de ramification entre différents génotypes de quinoa.

6.2. Couleur de la panicule à la floraison

○ Fréquences par couleur de panicule

Les catégories observées sont :

- Pourpre : 108 observations (21,1% du total)
- Vert : 403 observations (78,9% du total)

Cette répartition montre une nette dominance de la couleur verte dans les panicules des génotypes étudiées, avec une distribution exclusive selon les génotypes.

Le génotype Q102 est la seule avec une couleur de panicule exclusivement pourpre. Les autres génotypes (Giza, Q103, Q104, *Santa Maria*) montrent uniquement des panicules de couleur verte à la floraison. Ce résultat reflète une différenciation variétale nette (Figure 46).

Selon le test χ^2 (Chi-squared test) p-value : $< 2.2e-16$, extrêmement faible ($< 0,05$) indique une différence statistiquement significative entre les génotypes en ce qui concerne la couleur de leurs panicules. Cela démontre que cette caractéristique est liée à des distinctions variétales et pourrait être influencée par des facteurs génétiques ou environnementaux.

Le **V de Cramer** égal à 1,00 confirme une dépendance parfaite entre la couleur de panicule et le génotype, renforçant l'idée que la couleur est une caractéristique propre et exclusive à certains génotypes.

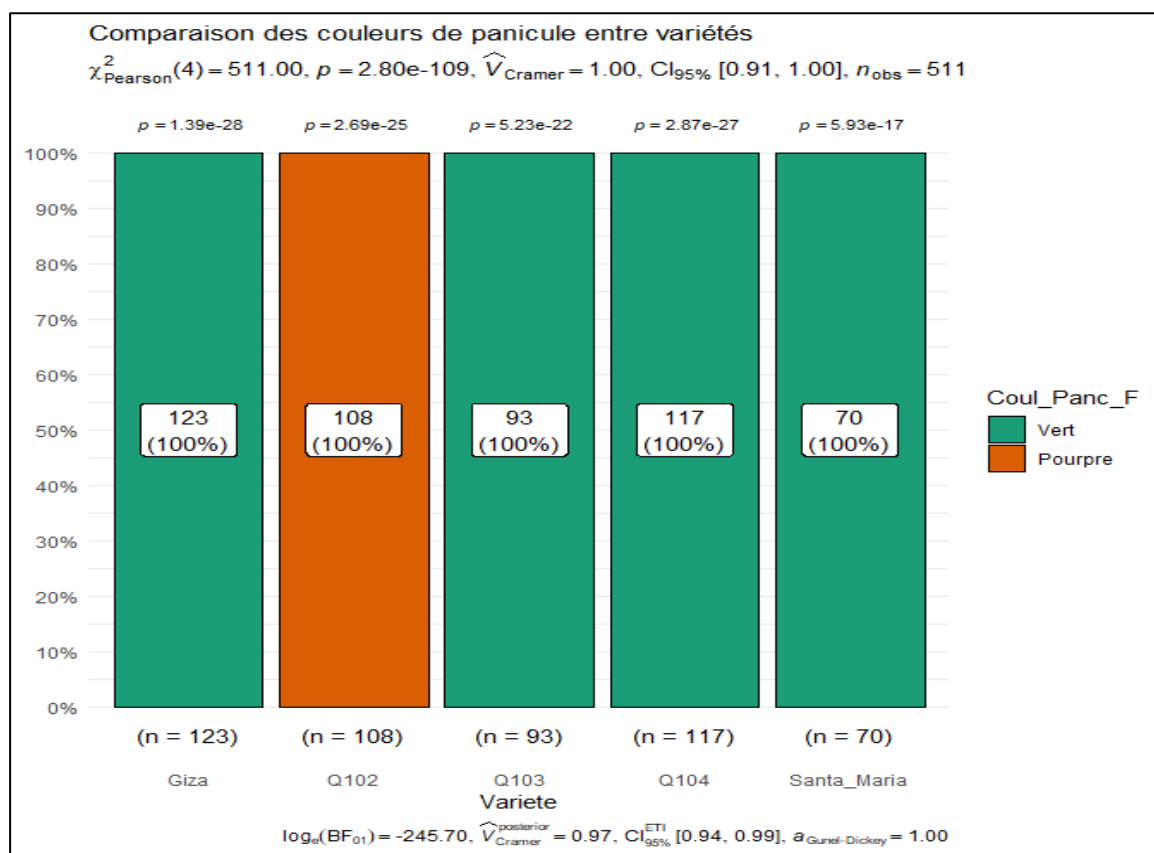


Figure 46 : Comparaison des couleurs de panicule à la floraison entre différents génotypes de quinoa.

6.3. Couleur de panicule à la maturité

○ Fréquences par couleur de panicule

Les résultats montrent une répartition inégale des différentes couleurs secondaires de panicule parmi les observations :

- **Beige** : 125 observations.
- **Blanc** : 85 observations.
- **Blanc sale** : 78 observations.
- **Jaune** : 79 observations.
- **Marron** : 20 observations.
- **Orange** : 111 observations.

Cela suggère que les couleurs beige et orange dominant, tandis que la couleur marron est nettement plus rare.

Les résultats du test χ^2 montre que la p-value : $< 0,0001$ étant largement inférieure à 0,05, le test révèle une différence hautement significative entre les génotypes en termes de distribution des couleurs de panicule à la maturité. Ces différences peuvent refléter des spécificités génétiques entre les génotypes ou des adaptations phénotypiques à l'environnement de culture.

Le graphique (Figure 47) montre clairement que le génotype Q102 est exclusivement associée à la couleur orange, *Santa Maria* présente uniquement des panicules de couleur blanc sale (blanchâtre), et le génotypes Giza se distingue par une répartition complète de la couleur beige, ainsi que chez Q103 la dominance de la couleur blanc, en revanche Q104 présente des panicules de couleurs plus variées (jaune, blanc, beige, marron, orange), avec une dominance de la couleur jaune

La statistique de Cramer V 0,96 montre une association très forte entre la couleur de panicule et le génotype, suggérant que la couleur est presque entièrement déterminée par le génotype (génétiques).

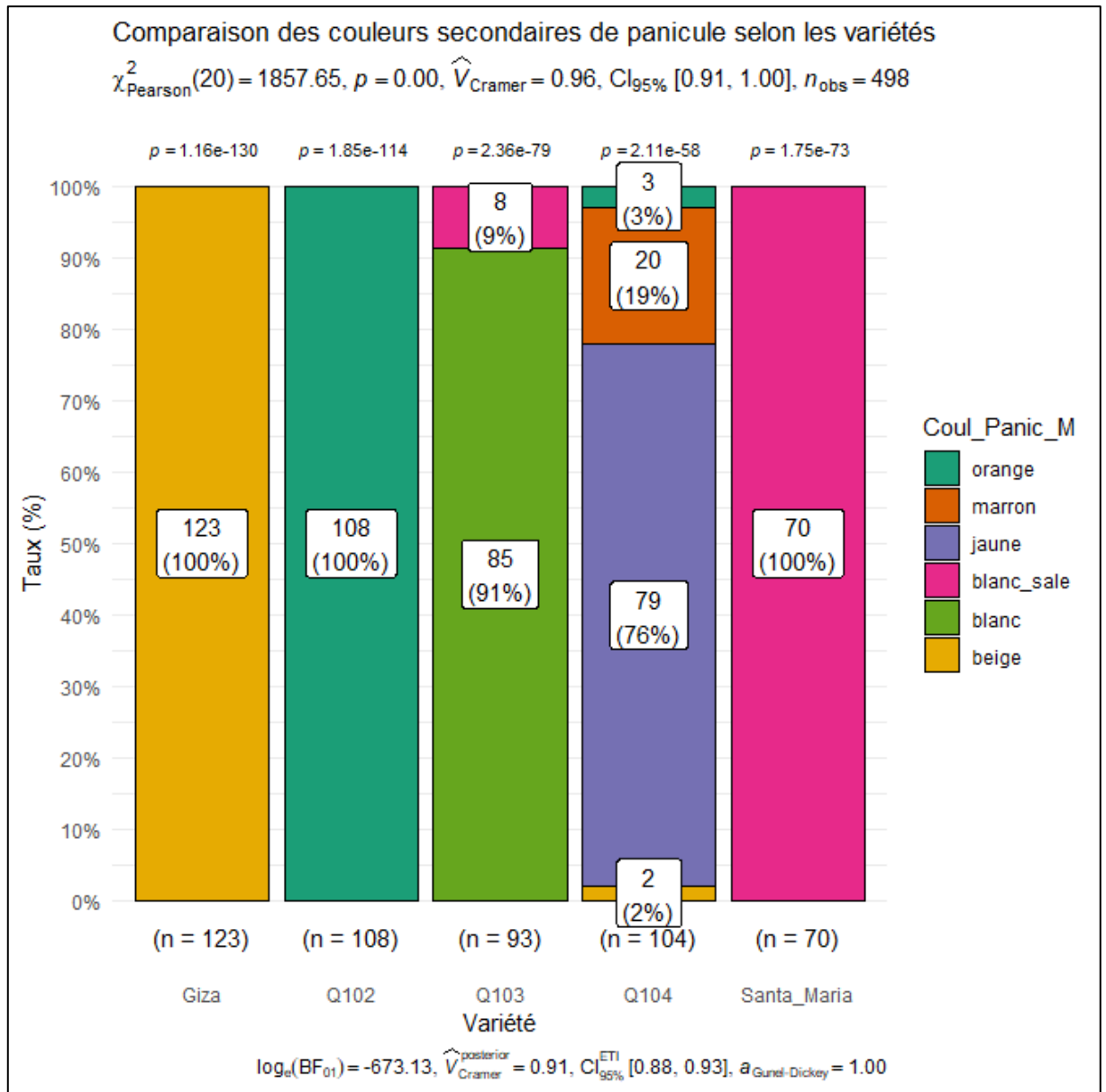


Figure 47 : Comparaison des couleurs de panicule à la maturité entre différents génotypes de quinoa.

6.4. Forme des feuilles

- **Fréquences par type de forme de feuille**
- **Catégories observées :** Rhomboïdale et Triangulaire.
 - **Forme triangulaire :** 425 observations (83% du total).
 - **Forme rhomboïdale :** 86 observations (17% du total).

Cette différence importante dans la répartition suggère que la forme triangulaire est largement prédominante chez les génotypes étudiés.

Analyse statistique du test χ^2 (Chi-squared test) montre que La p-value : 0,000397, nettement inférieure à 0,05, indique une différence statistiquement significative entre les génotypes en termes de forme de feuille. Ce résultat peut être lié à des différences génétiques ou à des adaptations spécifiques aux conditions environnementales

Cela signifie que la distribution des formes de feuille varie de manière non aléatoire parmi les génotypes. Ce résultat peut être lié à des différences génétiques ou à des adaptations spécifiques aux conditions environnementales

Le graphique figure 48 montre que les génotypes Giza, Q102 et Q103 affichent des proportions très élevées de feuilles triangulaires (respectivement 86%, 88% et 92%). Q104 montre une répartition modérée avec 75% de feuilles triangulaires et 25% de feuilles rhomboïdales. Cependant *Santa Maria* présente la proportion la plus faible de feuilles triangulaires (71%) et la proportion la plus élevée de feuilles rhomboïdales (29%).

Un Cramer V de 0,18 indique une association modérée entre la forme de feuille et la variété. Cela appuie l'idée que le génotype joue un rôle important dans la détermination de la forme des feuilles.

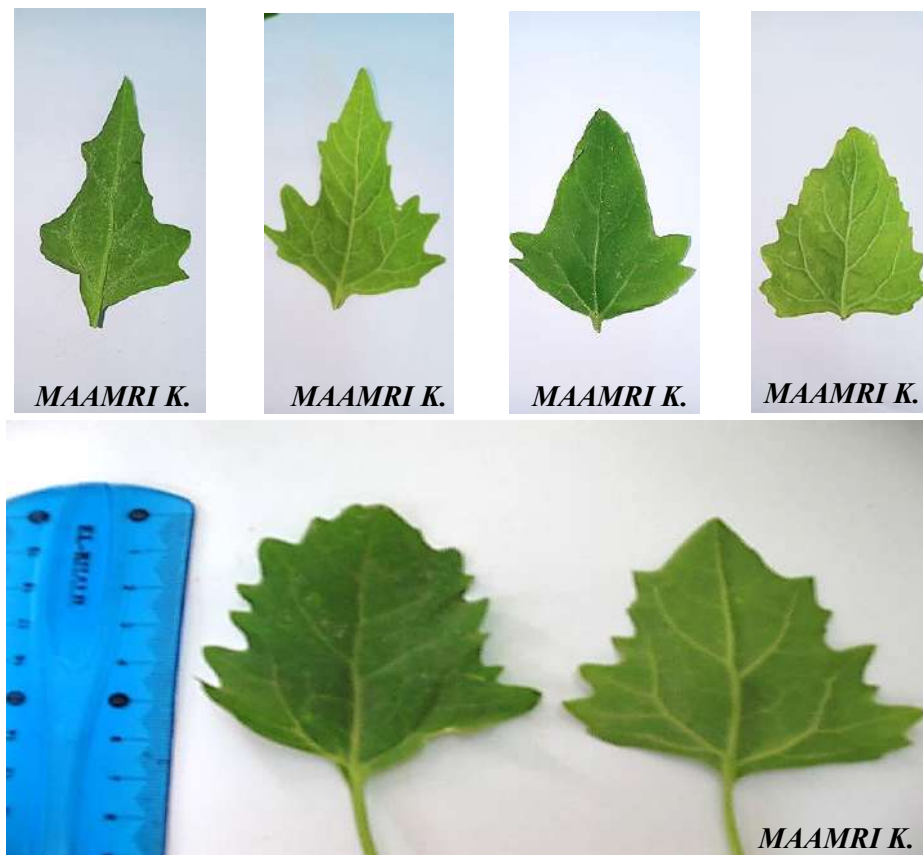


Photo 15 : Variation de la forme des feuilles des génotypes de quinoa étudiés, cultivés à Ouargla pendant la saison hivernale.

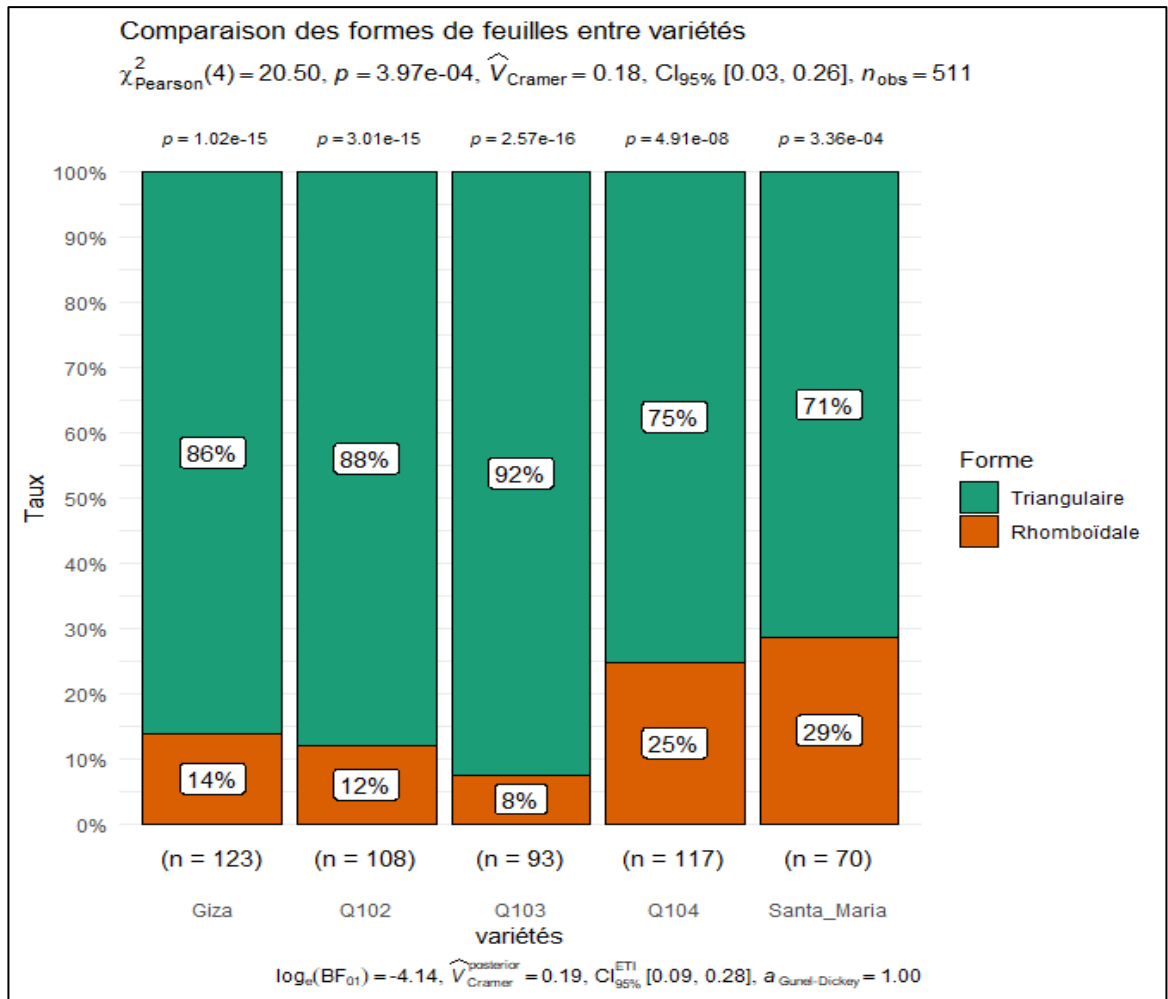


Figure 48 : Comparaison des formes des feuilles entre différents génotypes de quinoa.

6.5. Type de bord de feuille

○ Fréquences par type de bord de feuille

Les données montrent deux catégories de bord de feuille : lisse et denté. La répartition est largement dominée par le type denté, qui représente 454 observations, soit environ 89% du total. Le type lisse ne compte que 57 observations, soit environ 11% du total.

Selon le test χ^2 (Chi-squared test), la p-value inférieure à 0,05 (p-value : 0,0002429) indique une différence significative entre les variétés en termes de type de bord de feuille. Giza et Q104 affichent une dominance claire des feuilles à bord denté, respectivement à 93% et 97%. Q102 se démarque avec 20% de feuilles lisses, ce qui est nettement plus élevé que dans les autres génotypes. *Santa Maria* présente un équilibre relatif, avec 17% de feuilles lisses et 83% de feuilles dentées.

Les types de bord ne sont pas distribués de manière aléatoire parmi les génotypes, mais sont influencés par la génétique ou d'autres facteurs liés à chaque génotype.

La statistique de Cramer V: 0,19, bien qu'inférieure à 0,20, indique une association modérée entre le type de bord de feuille et le génotype, bien que modérée, appuie l'idée d'une influence non négligeable du génotype sur cette caractéristique



Photo 16 : Variation du bord des feuilles des génotypes de quinoa étudiés, cultivés à Ouargla pendant la saison hivernale.

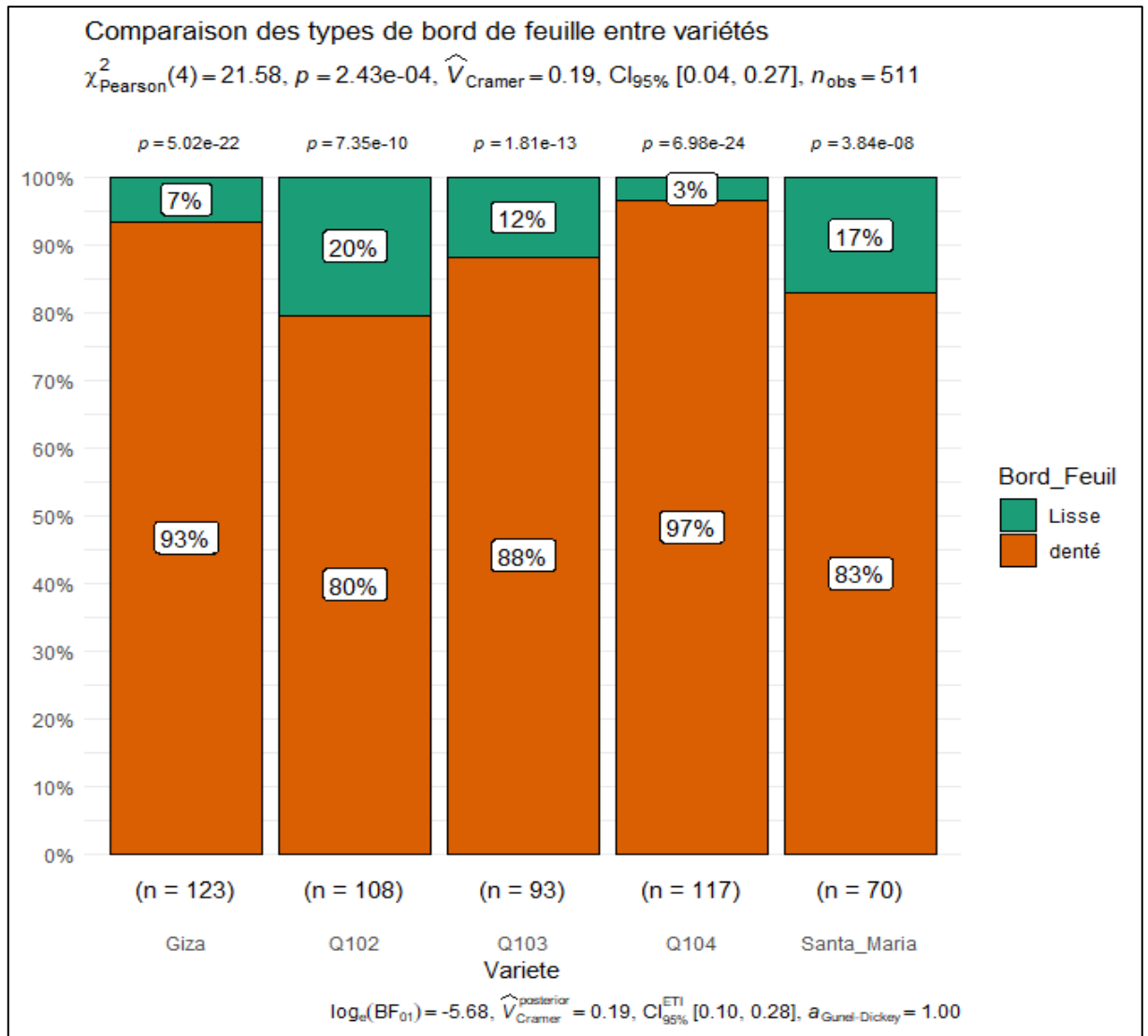


Figure 49 : Comparaison des types de bords des feuilles entre différents génotypes de quinoa

6.6. Forme des panicules

○ Fréquences par forme de panicule

Les données montrent deux catégories principales de formes de panicule : amaranthiforme et glomérulaire.

- **Forme amaranthiforme** : 231 observations, soit environ 45% du total.
- **Forme glomérulaire** : 278 observations, représentant 55% du total.

Ces chiffres indiquent une répartition légèrement équilibrée, bien que la forme glomérulaire soit légèrement dominante.

Selon le test χ^2 (Chi-squared test) La p-value $< 2.2\text{e-}16$, extrêmement faible, indique une différence hautement significative entre les génotypes en termes de forme de panicule.

Le graphique (figure 49) met en évidence des différences marquées, Giza et Q102 présentent presque exclusivement la forme amaranthiforme (respectivement 99% et 100%). Q103, Q104, et *Santa Maria* montrent une dominance complète ou quasi complète de la forme glomérulaire. Ces variations entre les génotypes soulignent que la forme de panicule est fortement influencée par des facteurs génétiques propres à chaque variété.

Comparaison des génotypes selon (graphique de contingence et Cramer V) montre une valeur très élevée de Cramer V démontre une forte association entre la forme de panicule et le génotype. La quasi-totalité des génotypes est associée exclusivement à une seule forme, confirmant l'influence déterminante de la génétique.



Photo : Variation de forme de panicule des génotypes de quinoa étudiés, cultivés à Ouargla pendant la saison hivernale.

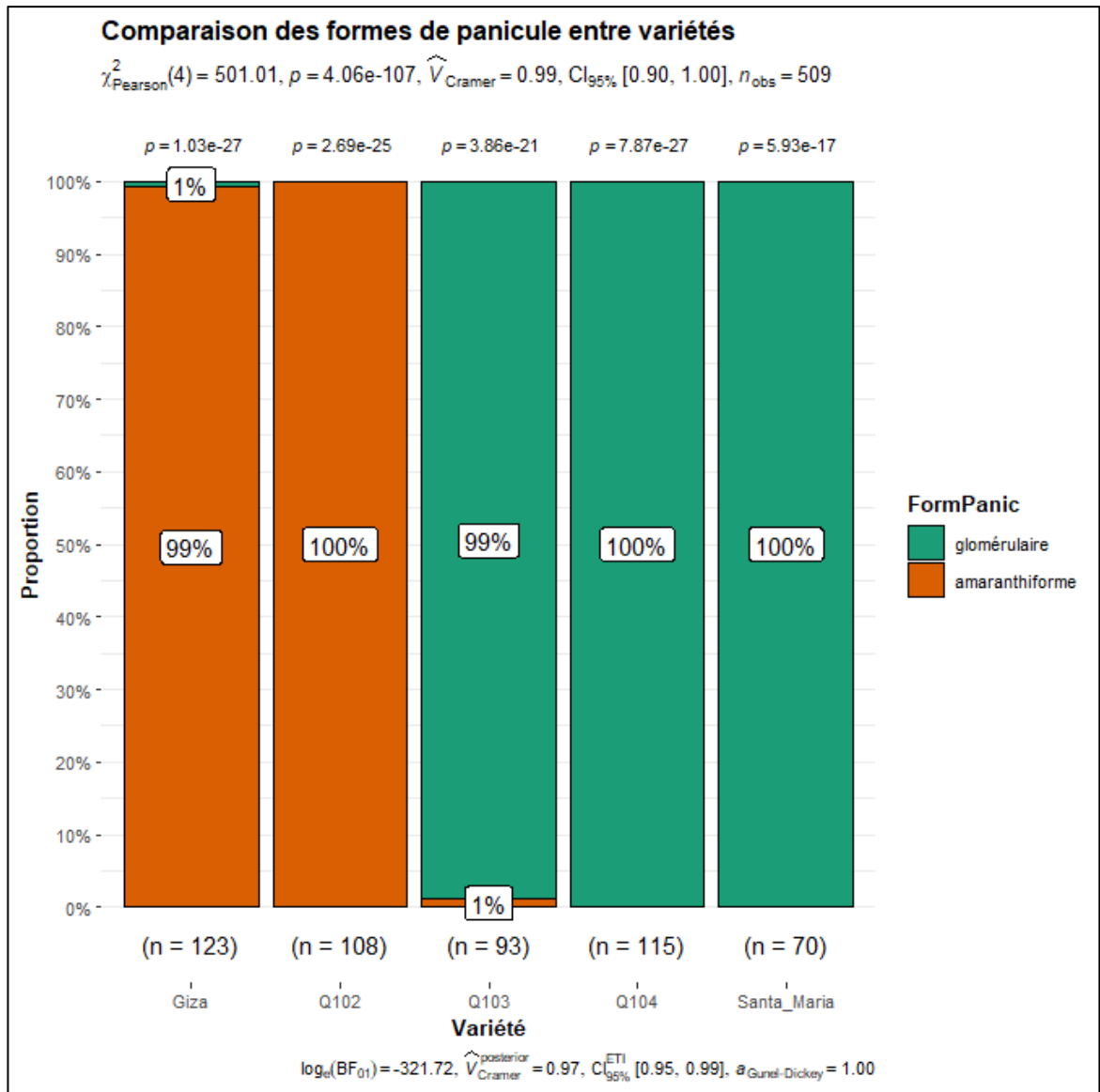


Figure 50 : Comparaison des formes de panicule entre différents génotypes de quinoa.

7. Analyse Factorielle de Données Mixtes (FAMD)

La représentation graphique issue d'une Analyse Factorielle de Données Mixtes (**Factor Analysis of Mixed Data**) (FAMD) cherche à visualiser simultanément des individus (points) et des variables quantitatives et qualitatives dans un espace de dimension réduite. Ici, le plan factoriel affiché est formé par les deux premiers axes principaux, qui expliquent le maximum de la variance des données 99 %.

- **Position des Individus (Points) :** La position de chaque point représente un individu (une plante) dans l'espace défini par les axes factoriels. Les individus proches les uns des autres ont des profils de variables similaires. La couleur des points indique l'appartenance à différents

génotypes (Giza, Q102, Q103, Q104, *Santa Maria*). On observe une certaine agrégation des individus en fonction de la variété, suggérant des différences significatives entre elles.

- **Axes Factoriels :**

- **Axe Horizontal (Axe 1) :**

Elle représente le principal axe de variabilité, lié à des variables quantitatives telque: Diam_Panic, Pds_MS_Ae, Pds_MF_Ae, Long_Panic, Haut_plante, Prod_Plante, ces variables indiquent des caractéristiques de croissance et de rendement du quinoa. Les variables pointant vers la droite sont positivement associées aux individus situés à droite, et inversement. Donc les génotypes Giza et Q102 sont clairement influencées par ces paramètres. Cela suggère que ces variétés ont été particulièrement performantes en termes de biomasse et de production. Inversement, les génotypes Q103 et *Santa Maria* sont éloignées de ces paramètres. Ces génotypes semblent moins productifs mais compenseraient par des caractéristiques de graines spécifiques (PMG et diamètre de grains).

- **Axe Vertical (Axe 2) :**

Elle différencie les génotypes selon des caractéristiques plus qualitatives, notamment : Coul_Panic_M, Coul_Panic_F, ainsi que ceux liés au développement végétatif (Nbre_dents_feuille, bord et forme des feuilles). Cet axe apporte une information complémentaire pour distinguer les individus au sein de chaque groupe de génotypes et potentiellement selon d'autres caractéristiques non directement liées à la discrimination principale observée sur l'axe 1

Regroupement :

Les génotypes génétiquement similaires ou ayant des profils phénotypiques similaires tendent à se regrouper. **Q104 et Q102** semblent former des groupes distincts, indiquant des profils uniques par rapport aux autres variétés. Q104 est positionné dans le quadrant supérieur-gauche. Comporte des caractéristiques intermédiaires, proches de *Santa_Maria* mais distincte par la couleur de panicule a la maturité. Variables discriminantes : Coul_Panic_M. Tandis que Q102 est dans le quadrant inférieur-droit, positionnée en bas à droite (valeurs positives axe 1 et négatives axe 2). Regroupée dans la même région que Giza, avec un comportement similaire lié à des variables quantitatives de croissance et de rendement telque : Diam_Panic, Pds_MS,

Pds_MF, Long_Panic, Haut_plante, diamètre de tige principale Prod_Plante. Variables discriminantes : nombre de panicule par plante

Santa_Maria et Q103 présentent un certain chevauchement et sont situés dans les régions supérieure-gauche et centrale-gauche, suggérant des caractéristiques communes ou une séparation moins distincte entre elles. Regroupées à gauche (valeurs négatives sur axe 1). Liées à des caractéristiques qualitatives comme la forme et la bordure des feuilles, épaisseur des graines, Indice_Récolte, Bord_Feuil, Forme_Feuil, variables discriminantes : PMG et diamètre de grains

- **Giza** Regroupée à droite du graphique (axe 1) largement distribuée mais montre un certain chevauchement avec *Santa Maria* et Q103, particulièrement dans le quadrant inférieur-gauche. Forte contribution des variables liées à la production et la taille : Diam_Panic, Long_Panic, Haut_plante, Prod_Plante, Pds_MS_ Pds_MF. La variable discriminante est : la couleur de panicule a la maturité.

- **Corrélations Positives:**

- Le fort regroupement de traits dans le quadrant inférieur-droit (par exemple, "Prod_Plante", "Haut_plante", "Long_Panic", "Diam_tige_princ", divers poids de panicule/biomasse) indique que ces traits sont fortement corrélés positivement. Ceci est agronomiquement logique ; des plantes plus grandes, plus vigoureuses avec de plus grandes panicules ont tendance à avoir une production/un rendement plus élevé.

- **Corrélations négatives:**

- Les traits du bas à droite sont généralement négativement corrélés avec les traits du haut à gauche et du bas à gauche, tels que "Indice_Récolte" ou "Epaisseur_graine". Cela signifie que les génotypes ayant des valeurs élevées pour un ensemble de traits pourraient avoir des valeurs faibles pour l'autre.

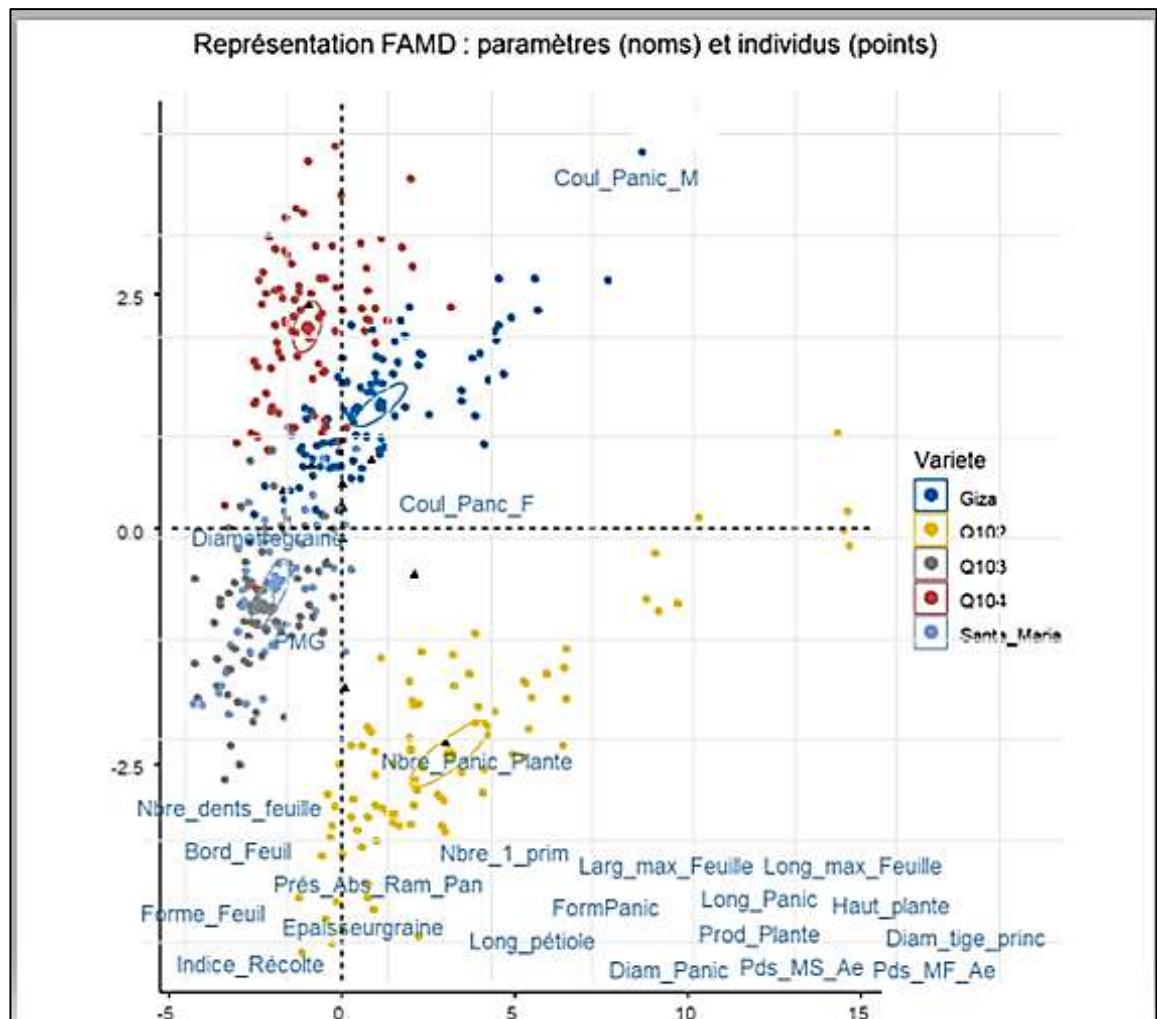


Figure 51 : Analyse Factorielle de Données Mixtes (FAMD)

Discussion

Dans cette étude, nous avons examiné le potentiel adaptatif de cinq génotypes de quinoa d'origine andine dans deux sites de la région de Ouargla sud-est de l'Algérie pour une culture en plein champs, le site 1 exploitation d'université (CE 9,95dS/m) a salinité très élevée, et le site 2 exploitation de ITDAS (CE 0,83dS/m) a faible salinité du sol. Nous les avons également caractérisés en fonction de leur cycle de croissance, des caractères morphologiques et du rendement. Les résultats de cette recherche ont identifié une différence non significative selon les génotypes de quinoa entre les deux sites. Les génotypes ont montré le même comportement (similarité) pour la majorité des caractères étudiés entre sites et années, une absence de signification statistique de l'interaction (génotype×année) et (site ×génotype) justifiant la stabilité des génotypes étudiés et leur tolérance à la salinité. Cela confirme ainsi qu'il est classé comme halophyte facultatif, ce qui signifie qu'il peut pousser dans des sols salins et non salins. Des études ont montré que le quinoa peut tolérer des conductivités électriques (CE) de l'ordre de 10 à 20 dS/m, voire beaucoup plus pour certaines variétés (Jacobsen et al, 2000),

Les résultats ont identifié une différence significative parmi les cinq génotypes de quinoa concernant divers caractères quantitatifs. La PH (hauteur de la plante) des génotypes variait significativement de 31 cm à 63,53 cm. Cette constatation ne confirme pas et faible par rapport aux observations rapportées par Jannatul et al (2024) au Bangladesh, ni celle de Granado-Rodríguez et al (2021) qui ont également constaté que la PH variait de 60 à 135 cm, encore l'étude de Oustani et al (2023) menée dans le sud-Est de l'Algérie qui ne confirme pas ce résultat et notant une moyenne plus élevée d'hauteur de la plante qui est entre 70 et 123 cm. Ces différences pourraient résulter de la variabilité génétique entre génotypes. Selon Sephar et al (2009) et Tan et al (2018), les hauteurs des plantes étaient différentes selon les variétés et les populations de quinoa. De plus nos résultats concordent avec celle de Oustani et al (2023), qui ont rapporté que les génotypes à maturité tardive comme Q102, sont plus grands que les génotypes à maturité précoce.

Le diamètre de la tige de la présente étude variait entre 4,63 mm et 9,19 mm ce qui est relativement inférieurs d'une part aux résultats de Tang et al, (2024) qui ont rapporté que l'épaisseur de la tige oscillait entre 9,64 et 10,72 mm chez les génotypes à faible, moyen et haut rendement, et d'autre part, à ceux de Jannatul et al (2024) qui ont rapporté un diamètre de 6,54 à 10,84 mm

Par conséquent, la hauteur et le diamètre de tige présentent une variabilité de croissance entre les génotypes, Q102 et Giza notent les valeurs les plus élevées, alors que Q103 et *Santa Maria* montrent les faibles valeurs.

Les génotypes différaient significativement en longueur et diamètre de panicule. La longueur de panicule variait de 8 à 15 cm, tandis que le diamètre allait de 32 à 49 mm. Q102 a enregistré les valeurs les plus élevées en longueur et diamètre de panicule, tandis que *Santa maria* et Q103 ont enregistré les valeurs les plus faibles. Le nombre de panicules dans la présente étude est faible (4 à 7 panicules/plante) comparé à celui rapporté par Hussain al. (2018) qui ont indiqué des valeurs moyennes comprises entre 13,44 et 16,16 panicules/plante, tandis qu'Oustani et al. (2023) ont rapporté un nombre de (8 à 14 panicules/plante). Le poids de mille graines des génotypes variait de 3,2 à 4,3g, ce qui était proche aux résultats de Jannatul et al (2024), Coronado et al (2023), Sarwar et al (2023), Bhargava et al (2006), Granado-Rodríguez et al (2021) et Craine et al (2023) qui ont rapporté un poids de mille graines entre 2 à 4 g. Q104 et *Santa Maria* ont le poids le plus élevée tandis que Q104 et Giza le plus faible.

L'indice de récolte des génotypes variait de 0,64 à 0,74 ce qui était supérieur à l'indice de récolte moyen rapporté par Laki et al (2024) et Rojas (2003) qui ont indiqué des valeurs variant respectivement de 34 % à 40 %. Jannatul et al (2024) ont quant à eux montré aussi un indice de 0,48 à 0,50. Le quinoa présente généralement de faibles valeurs moyennes d'indice de récolte, comme l'ont noté Bertero et al (2004). L'indice le plus élevé est chez certains génotypes indique qu'une plus grande proportion de biomasse est allouée au rendement en graines, suggérant une efficacité physiologique plus élevée une incidence économique positive. Une variation significative du rendement en grains par plante a été observée entre les génotypes avec des valeurs variait allant de 5,35 à 20,73 g. Ces résultats sont proches de ceux de Jannatul et al (2024), dans les moyennes variait de 7,80 à 22,40 g, ainsi que par Shah et al (2020) et Manugade et al (2023) qui ont rapporté des rendements moyens par plante de 19,86 g et de 15,00 g. En revanche, Bhargava et al (2006), De Santis et al (2016), et Craine et al (2023) ont rapporté un rendement moyen qui est plus faible qui sont respectivement de 4,06, 5,51 et 6,33 g, respectivement. Ces résultats suggèrent la présence dans notre étude de génotypes à haut rendement, ce qui pourrait être précieux pour les programmes de sélection visant à améliorer la reproduction et le développement de génotypes de quinoa à haut rendement en conditions sahariennes. La biomasse aérienne variait de 2 à 24,99 g ce qui est inférieur à ce que rapporte Jannatul et al (2024) qui sont de 19,66 à 61,74 g. Bhargava et al (2006) ont également constaté

que la biomasse aérienne oscillait entre 1,11 à 52,89 g. Une variation des caractéristiques foliaires a également été observée entre génotypes en termes de longueur de pétiole, longueur et largeur max des feuilles avec une moyenne variait de 28,03 à 40 mm pour le pétiole, et de 40,65 à 61,14 mm pour la longueur des feuilles, et de 35,93 à 52,98 mm pour la largeur. Q102 et Giza ont alors présenté les valeurs les plus élevées des caractéristiques foliaires, contrairement à Q103 et *Santa Maria* qui montrent les plus faibles valeurs.

Les résultats de la recherche ont identifié une diversité significative parmi les génotypes de quinoa concernant divers caractéristiques qualitatifs. La majorité des génotypes présentent une absence de ramifications pour environ 64% de l'ensemble, et les génotypes Giza, Q102 et Q103 ont présenté une forte proportion de plantes sans ramification de 67 à 70 %, tandis que Q104 présente un pourcentage équilibré avoisinant les 52%. La valeur de Cramer V 0,12 indique une faible association entre la variété et la présence ou l'absence de ramifications, suggérant que ce caractère pourrait également être influencé par d'autres éléments environnementaux (densité de semis). Cependant, cette association reste pertinente notamment dans le cadre de la sélection variétale. Selon Kir et Temel (2016), la densité de plantation, la fertilisation et d'autres éléments environnementaux influencent les ramifications. La morphologie des feuilles de tous les génotypes étudiés, en termes de forme, était en majorité rhomboïdale pour Q104 et *Santa Maria*, triangulaire pour Q102, Q103 et Giza. Tandis que les bords des feuilles est dominée par le type denté, qui représente environ 89% du total, le type lisse compte environ 11% du total. La forme et la couleur de la panicule ont également montré une diversité ce qui pourrait avoir des implications sur le rendement et la qualité des graines. La forme et la couleur de panicule présentaient une différence significative entre les génotypes, Giza et Q102 affichent une forme amarantiforme, tandis que les autres génotypes avaient des formes de type glomérulaire.

Les génotypes présentant des panicules amarantiformes ont un meilleur rendement en grains. Par ailleurs, la couleur des panicules était pourpre pour Q102 et vert pour les autres génotypes au stade floraison. Toutefois, elle évoluait différemment selon les génotypes : orange pour Q102, beige pour Giza, blanche pour Q103, blanchâtre pour *Santa Maria*, et multicolore pour Q104, combinant le jaune, le marron, l'orange et le beige. Ces observations, corroborent nos résultats. Une variabilité dans la couleur de l'inflorescence a également été rapportée par Voronov et al (2023). Le nombre de jours jusqu'au début de floraison variait de 53 à 108 jours, alors que la maturité a été atteinte entre 132 et 175 jours. Ces résultats ne confirment pas ceux

ramené par Jannatul et al (2024), qui ont observé une floraison allant entre de 22,33 à 27,33 jour et une maturité entre 74,67 à 85,00 jours.

Cependant, nos résultats sont proches de ceux rapportés dans d'autres régions : dans le nord de l'Inde Bhargava et al (2006) ont notés une durée allant entre 109 et 163 jours et dans le sud de l'Égypte Shams (2018) a rapporté une durée variante entre 115–160 jours. De même, Hirich et al (2014) ont enregistré une durée de 121 jours au sud du Maroc. En Égypte, des valeurs identiques ont été enregistrées dans les gouvernorats de Sharqiya et d'Ismaïlia : AlNaggar et al (2017) ont rapporté une durée de 135 à 139 115 à 160 jours à Sharqiya, tandis que Shams (2014) a noté une durée de 115 à 160 jours à Ismaïlia.

La grande variabilité génétique observée entre les cinq génotypes concernant la maturité de la récolte dans la présente étude et s'explique par les différences dans les conditions environnementales régionales, de l'origine des graines, et l'altitude comme le souligne Shams (2014). Ouastani et al (2023) ont signalé un cycle de croissance variant de 150 à 169 jours dans la région de Oued Righ, au sud-est de l'Algérie.

Les génotypes utilisés dans notre expérience étaient principalement des génotypes à cycle long et moyen. Toutefois ces génotypes à longue durée de croissance peuvent être menacés par les périodes de chaleur extrême. Il est donc nécessaire de bien positionner la culture de quinoa dans les zones arides afin d'éviter que les stades phénologiques sensibles ne coïncident avec les pics de température.

- **Positionnement de la culture de quinoa pour éviter les hautes températures**

Le quinoa est une culture qui a attiré l'attention au cours des dernières décennies et a fait l'objet de recherches approfondies menées récemment dans toutes les régions du monde. Cette étude confirme que le quinoa présente une tolérance élevée à la salinité notamment en site1, ce qui en fait une culture alternative pour les régions confrontées à des conditions climatiques extrêmes, telles qu'une chaleur excessive, une sécheresse marquée et une salinité élevée), (Hirich et al, 2014 ; Hirich, et al, 2021 ; Choukr-Allah et al, 2016 ; Ikbal et al, 2019). Nos recherches comptent parmi les premières études en Algérie sur l'adaptation du quinoa et elles peuvent être comparées aux études précédentes menées à travers le monde. En raison des problèmes croissants de la salinité dans le monde, en particulier dans les zones arides, à la nécessité d'introduire de nouvelles cultures adaptées aux conditions difficiles (saline, sécheresse, température élevée), les résultats de cette étude confirment le potentiel du quinoa

en tant que culture alternative. Son intégration dans les systèmes agricoles de la région de Ouargla dominé par la phoeniciculture et diverses cultures associées telles que la luzerne, ainsi que les céréales sous pivot (blé, orge, maïs) pourrait renforcer la résilience de l'agriculture locale face aux contraintes environnementales. La salinité est responsable de la baisse des rendements en graine et devient un critère d'évaluation majeur pour le développement agricole dans les régions arides (Benbrahim et al, 2016). La production est limitée à environ 3,6 t/ha (DSA, 2018), mais les seuils pour une réduction de 100 % des rendements ont désormais été atteints, et il n'y aura plus de production céréalière dans 50 à 70 ans en raison de l'augmentation constante de la salinité (Benbrahim et al, 2016).

Néanmoins, suite à l'introduction du quinoa dans le Sahara algérien, les résultats de cette recherche ainsi que d'autres essais de démonstration dans des stations de recherche dans les zones arides de l'Algérie corroborent les études menées au Maroc et en Égypte sur l'adéquation du quinoa pour l'adaptation dans les zones arides. Cette étude indique que le quinoa pourrait être proposé comme culture de diversification, en l'intégrant dans les systèmes de culture existants, comme sous-culture dans les palmeraies (culture fourragère) et en rotation avec les grandes cultures (blé et maïs), afin d'enrichir les systèmes de culture actuels avec des espèces alternatives et accroître leur durabilité dans cette région.

La région de Ouargla se caractérise comme l'ensemble du bas Sahara par un climat de type désertique, dont les amplitudes thermiques entre les minima et les maxima sont importantes, et par une pluviométrie très faible d'environ 50 mm par an (Khadraoui, 2007), il est signalé que la température très élevée présente une contrainte majeure pour le choix des cultures, or les fortes températures (maximales), notamment celles de l'été peuvent dépasser les 50 °C (en mois de juillet), de même moyenne des températures minimales atteint 4,5 °C en hiver (mois de Janvier).

Le quinoa est une plante halophyte rustique qui peut s'adapter aux différentes aires géographiques et aux différents stress abiotiques notamment la sécheresse, le gel et le stress thermique (Bertero et al, 1999 ; Jacobsen et al, 2003 ; Adolf et al, 2013 ; Hirich et al, 2014 ; Bazile et al, 2017). Malgré son adaptation en dehors de son aire géographique et sa résistance à divers stress abiotiques dont le stress thermique, mais les hautes températures pendant la phase de germination et de floraison affectent considérablement la plante précisément le rendement en graines et la fertilité des semences pour la campagne suivante. Le quinoa peut tolérer une large gamme de températures allant (-8 °C à 35 °C), selon les caractéristiques génotypiques et le stade phénologique (Jacobsen et al, 2005).

Dans ce contexte, plusieurs études se sont intéressées à la tolérance de quinoa au stress thermique (Lesjak et Calderini, 2017 ; Pulvento et al, 2010 ; Peterson et Murphy, 2015 et Walters et al, 2016). Ces travaux ont analysé l'effet du stress thermique sur les différentes phases de développement du quinoa, y compris la germination et la floraison.

Au Chili, Lesjak et Calderini, (2017), ont rapporté une diminution du rendement en graines lorsque la température de floraison atteignait 34 °C. En Italie, il a été démontré que la variété *Titicaca* réagit négativement aux températures élevées, avec une diminution des rendements en graines de moitié lorsque la floraison se produisait autour du mois de juillet (Pulvento et al, 2010). D'autres études ont montré que des températures plus élevées (20 °C à 25 °C) pouvaient favoriser la croissance du quinoa par rapport à des températures plus basses allant de 8 à 18 °C (Yang et al, 2016). Toutefois, sur la base de tests menés au Burkina Faso et dans les régions sahéliennes, MENA et méditerranéennes, Alvar-Beltrán et al, (2020) ont constaté que des températures élevées (entre 34 °C et 38 °C) sur le quinoa (*cv. Titicaca*) entraînaient des pertes de rendement en graines (réduction de 25 %). Pour cette raison le seuil maximal de température lors de la floraison a été identifié à 38 °C. Les mêmes auteurs ont également constaté qu'à des températures supérieures à 34 °C, le taux de germination des graines diminuait de plus de 50 %. Étant donné que le quinoa a été introduit récemment en Algérie, les connaissances et le savoir-faire des agriculteurs concernant cette plante restent très limités. Ce travail propose donc une nouvelle approche pour déterminer la période optimale de culture du quinoa dans les régions de Bas Sahara (Ziban, Souf, Oued Righ, Ouargla) afin d'éviter les chaleurs extrêmes. En se basant sur des données météorologiques (température moyenne mensuelle maximale - TMM) fournies par CRU-TS4.03 (Harris, 2014) et réduites à une échelle locale avec World Clim2.1 (Fick et Hijmans, 2017), sur une période de 28 ans (1990–2018), nous avons produit 12 cartes pour évaluer le risque climatique mensuel lié aux températures élevées dans le bas Sahara Algérien à l'aide du logiciel ArcGis10.9 (ESRI-France : 92195 Meudon, France). D'après les études antérieures mentionnée précédemment, il nous est apparu indispensable de représenter la distribution de la température moyenne maximale sur toute l'année dans le bas Sahara (région d'Ouargla, Oued Righ, le Souf et Ziban) afin d'identifier la période adéquate à la culture de Quinoa dans ces régions hors des périodes à risques (Figure 52)

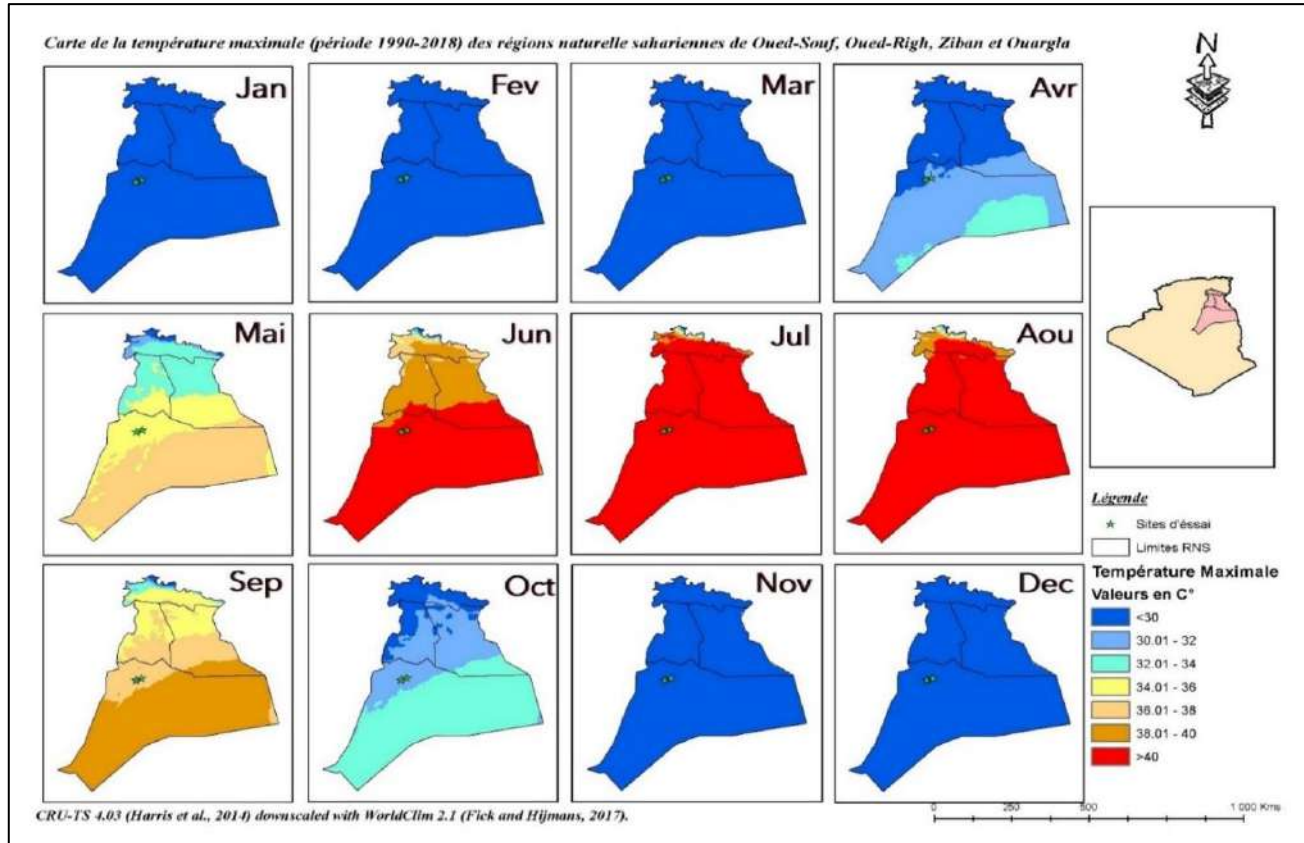


Figure 52 : Températures moyenne mensuelle maximale dans le bas sahara (**Ziban** – région nord-, **Souf** – région Est-, **Oued righ** – région Ouest-, **Ouargla**–région sud-) au sud-est de l’Algérie pendant la période (1990-2018)

La figure 52 montre les classes de températures moyennes maximal automatiquement générées. La première classe représenté en bleue (TMM) correspond à des températures basses : $TMM < 34^{\circ}\text{C}$ où les TMM sont basses et très adéquates à la croissance du quinoa et sont très proche à la température idéal comprise entre (optimal entre 15°C et 20°C) (Jacobsen et Bach, 1998 ; González et al, 2017 ; Bois et al, 2006 ; Mamedi et al, 2017; Alvar-Beltrán et al, 2020) correspondantes à la période septembre-mai pour la partie nord de Ziban, octobre-mai pour la partie nord de la région de Oued Righ et le Souf, et octobre-avril pour la toute la région de Ouargla et aussi la partie sud de Oued Righ et le Souf .

La deuxième classe, en jaune représente les TMM variant entre 34°C et 38°C , qui indiquent les températures limites (Mamedi et al., 2017). Ces températures sont considérées comme des seuils limites pour la floraison qui peut provoquer les avortements des fleurs, l’infertilité du pollen ou la production de graines stériles, ce qui réduit considérablement le rendement. Malgré que la température moyenne idéale pour le quinoa est d’environ 15 à 20°C , certaines variétés peuvent supporter des températures extrêmes allant jusqu’à 34°C à $+38^{\circ}\text{C}$ (Bazile et al., 2015).

Les périodes de sensibilité aux températures ont été enregistrées principalement lorsque la germination des graines se produit à des températures froides (gel) et lorsque la floraison a lieu à des températures élevées (FAO, 2011). Selon Alvar-Beltrán et al (2020) la plupart des pertes de rendement en graines (avec réduction notable de 25 %) se sont produites entre des niveaux de température comprise entre 34 et 38 °C, par ailleurs, les pourcentages de germination des graines les plus élevés sont entre 0 et 35 °C, qui vont ensuite régresser jusqu'à 40°C. Pour cette raison la température de 38°C est considéré comme le seuil de température maximum pour la floraison. Ce seuil est atteint au mois de septembre le sud de Ziban, Souf, Oued Righ, et la partie nord de Ouargla, et en mai dans l'ensemble de bas Sahara.

La troisième classe représentée en marron et rouge correspond à des températures TMM >38°C ces températures sont considérées comme le seuil critique de tolérance pour la floraison qui doivent donc être évitées durant cette phase sensible. Cette température correspond aux périodes allant de juin à aout dans l'ensemble des régions du bas Sahara, à l'exception du nord des Ziban et du sud de Ouargla, où elle est atteinte en septembre.

En se basant sur les cartes climatiques, nous analysons les températures maximales par mois pour les régions du bas Sahara à savoir le nord des Ziban, l'est du Souf, l'ouest de l'Oued Righ et le sud de Ouargla.

- **Janvier, Février, Mars, Novembre, Décembre :** les températures moyennes maximales sont majoritairement inférieures à 30°C (zones en bleu foncé). Cette période est potentiellement favorable pour la croissance notamment à la floraison de quinoa pour l'ensemble des régions du bas Sahara.
- **Avril :** le sud de Souf et Ouargla commencent à afficher des températures un peu élevées, comprise entre 30°C et 32°C (zone bleu clair), voire entre 32,01°C – 34°C (vert clair) dans le sud de Ouargla. Ces niveaux marquent le début de la période de chaleur.
- **Mai :** Les températures augmentent significativement, atteignant 34,01°C 36°C (jaune) dans la partie du sud d'Oued Righ et du Souf et dans le nord de Ouargla. Certaines parties de l'ouest et du sud de Ouargla enregistrent mêmes des températures comprises entre 36,01 °C et 38 °C (jaune foncé).
- **Juin :** Ce mois marque l'entrée dans une période de grande chaleur. La plupart des régions Enregistrent des températures variantes entre 38,01°C et 40°C affichées dans la zone marron, voire supérieure à 40 (zone rouge). Seules quelques zones du nord du Ziban qui présentent des températures modérées (36,01°C 38°C).

- **Juillet et Août :** Les conditions climatiques sont similaires à ceux du mois de juin ; voire très chaud, avec une prédominance du rouge sur la carte (plus de 40°C), ce qui indique des températures de plus de 40°C. Août apparaît comme le mois le plus chaud de l'année ou les températures excédant les 40°C, dans l'ensemble du Bas-Sahara (zones rouge).
- **Septembre :** Les températures commencent à diminuer, mais restent élevées, principalement entre 36.01°C 38°C et 38.01°C 40°C dans la partie sud du bas Sahara, et entre 32 °C et 36°C dans la partie nord (zone Jaune)
- **Octobre :** Les températures poursuivent leurs baissent, revenant à des valeurs plus modérées, inférieures à 36°C (zones bleu clair à foncé).

Étant donné que le quinoa a un cycle de croissance de 5 à 6 mois et que sa floraison est sensible aux températures élevées (adéquates en dessous de 32°C, avec un seuil critique à 34–38°C), il est crucial de planifier la date de semis de manière à ce que la période de floraison ne coïncide pas avec les mois les plus chauds de l'année (mai, juin, juillet, août, septembre).

Les stratégies de semis possibles pour un cycle de 5 à 6 mois sont les suivantes :

1. **Semis en automne/début d'hiver (septembre/octobre/novembre):**

- **Si semis en Octobre Novembre :** La floraison aurait lieu vers décembre-janvier et février - mars, périodes durant lesquelles les températures maximales sont < 30°C. En avril, les températures commencent à augmenter mais une grande partie restent sous 32°C. Cette fenêtre apparaît comme la plus prometteuse, car elle permet d'éviter l'exposition aux températures critiques pendant la floraison.
- **Le semis en Septembre :** cela pourrait être convenir uniquement pour le nord des Ziban où les températures maximales sont inférieures à 30°C. Dans les autres régions, les températures sont élevées dépassant les 34°C, ce qui provoque une régression de la germination à partir de 35°C (Alvar-Beltrán et al, 2020)

- **Le semis en Décembre :** La floraison aurait lieu vers avril-mai, période marquée par une élévation des températures supérieures à 34°C dans la partie sud, cela va compromettre le bon déroulement de la floraison. Cette fenêtre est trop tardive

2. Semis en Hiver (Janvier/Février) :

- **Si semis en Janvier- Février :** un semis effectué durant cette période entraînerait une floraison vers mai, juin ou juillet, ce qui correspond aux mois les plus chauds qu'il faut absolument éviter.

Pour positionner la culture de quinoa dans le Bas Sahara (Ziban, Souf, Oued Righ, Ouargla) et éviter les températures élevées, la meilleure période de semis serait l'automne, en particulier le mois d'octobre. Un semis en octobre permettrait à la floraison de se produire entre décembre et janvier. Pendant cette période, les températures maximales sont généralement inférieures à 30°C, ce qui est favorable pour la production de graines et la pollinisation. Le début de la croissance végétative se déroulerait pendant les mois frais de novembre à décembre, profitant de conditions moins stressantes. La récolte aura lieu au printemps avant l'arrivée des chaleurs intenses de l'été.

Les températures moyennes mensuelles élevées, qu'il convient d'éviter pour la culture du quinoa, offrent une première indication précieuse et originale pour le positionnement du cycle cultural dans le contexte saharien algérien. Toutefois, une analyse plus fine à l'échelle journalière reste nécessaire afin de mieux évaluer le risque réel encouru par les plantes et d'apporter aux agriculteurs des repères plus précis pour la planification du semis.

Les températures moyennes mensuelles élevées sont à éviter pour la culture du quinoa nous donnent une première indication très originale dans le contexte algérien, en conditions sahariennes, pour le positionnement le cycle de culture du quinoa selon les saisons agricoles même si un travail plus fin à l'échelle journalière reste encore nécessaire pour mieux prendre en compte et définir pour le paysan le risque réel encouru par les plantes de quinoa.

Conclusion

Conclusion

En conclusion, cette étude a permis d'apporter une contribution significative à la caractérisation de cinq génotypes de *Chenopodium quinoa* Willd. En vue de leur adaptation aux conditions agro-écologiques spécifiques du Sahara algérien, en prenant comme cas la région d'Ouargla. Les résultats obtenus ont mis en lumière des variations notables entre les génotypes étudiés en termes de paramètres morphologique, le rendement, ainsi que cycle de croissance en conditions de plein champs, évalués sur deux années successives et dans deux sites représentatifs d'un environnement aride combinant salinité, forte températures et sécheresse caractéristique de cet environnement aride. L'évaluation comparative permis d'identifier certains génotypes présentant des performances supérieures, notamment pour des caractères considérés comme clés tels que le rendement en grains et la biomasse aérienne, considérés comme déterminants pour une meilleure adaptation à l'environnement saharien. Ces différences inter-génotypiques soulignent le potentiel de la sélection variétale pour le développement de variétés de quinoa mieux adaptés aux conditions difficiles du Sahara algérien.

Les données issues de deux années d'essais ont révélé des différences significatives entre les cinq variétés de quinoa pour la majorité des paramètres étudiés. L'effet du génotype s'est avéré dominant, avec une stabilité interannuelle et intersites observée pour la plupart des caractères agronomiques. Les tests statistiques (Kruskal-Wallis), suivis de comparaisons post-hoc (test de Dunn), ont confirmé la significativité des différences observées ($p < 0,05$). Cependant, aucune variation significative n'a été notée pour la majorité des caractères mesurés chez l'ensemble des génotypes entre les deux sites, cela confirme le statut du quinoa en tant que plante halophyte facultative par excellence, capable de maintenir des performances stables dans des environnements contraignants.

Une variabilité significative a été observée parmi les caractères quantitatifs étudiés, notamment la hauteur de plante, le diamètre de la tige, la longueur et le diamètre de la panicule, le poids de matière fraîche, le rendement par plante, l'indice de récolte et le poids de mille graines, ainsi que le diamètre et l'épaisseur des graines. De même, une diversité marquée a été notée pour les traits qualitatifs, tels que la forme et la couleur de panicule aussi bien à la floraison qu'à la maturité, cette diversité offre un potentiel important pour la sélection et l'amélioration variétale du quinoa aussi bien sur le plan du rendement que de la qualité des grains. Certains génotypes étudiés en particulier Q102 et Giza, ont montré les meilleures performances en termes de

rendement en graines et de biomasse par rapport aux autres génotypes. En parallèle, les génotypes Q103 et Santa Maria se sont distingués par la taille importante de leurs graines, caractérisée par une épaisseur, un diamètre et un poids de mille grains élevés, ce qui suggère l'orientation de ces génotypes pour des rendements élevés ou la qualité des graines.

Selon l'Analyse en Composantes Principales Mixtes (FAMD), une corrélation positive significative a été notée entre rendement par plante et la hauteur de la plante, le diamètre de la tige, les caractéristiques foliaires, la biomasse aérienne et la forme de la panicule. Cela montre qu'un rendement accru par plante peut être atteint par une sélection appropriée.

Cette étude a révélé que les génotypes évalués présentent un cycle de croissance relativement long, avec une durée moyenne variant entre 143 et 175 jours. Le génotype Q102 a marqué un cycle le plus long. Par ailleurs, l'analyse cartographique des températures maximales du bas Sahara Algérien a fait ressortir que le semis en automne constitue la période la plus adéquate pour la culture de quinoa, car il permet d'éviter les hautes températures au moment de la floraison.

Cependant, il est important de noter que cette étude représente une première étape dans l'évaluation du potentiel agronomique du quinoa dans les conditions sahariennes. Elle constitue une ressource précieuse pour les programmes de sélection variétale, en fournissant des données essentielles sur la variation génétique observée, permettant ainsi d'identifier les génotypes souhaitables et de guider les stratégies de sélection pour améliorer des caractères spécifiques ou développer de nouvelles variétés avec les combinaisons de caractéristiques désirées.

Des recherches complémentaires restent nécessaires pour approfondir la compréhension des mécanismes d'adaptation spécifiques de ces génotypes, au niveau physiologique et moléculaire. Des essais agronomiques en plein champ sur plusieurs cycles culturaux et dans différentes localités sahariennes permettraient de valider la stabilité et la performance de ces génotypes prometteurs dans des conditions réelles de culture.

La caractérisation de ces cinq génotypes représente un point de départ essentiel pour des programmes d'amélioration génétique ciblés visant à développer des variétés de quinoa hautement performantes et résilientes face aux défis environnementaux du Sahara. Ainsi, le quinoa représente une solution prometteuse pour relever les défis agricoles dans des environnements contraignants comme le Sahara, tout en contribuant à la sécurité alimentaire et nutritionnelle de l'Algérie.

En définitive, cette recherche ouvre des perspectives encourageantes pour l'introduction du quinoa comme culture alternative potentielle pour diversifier les systèmes agricoles et renforcer

la sécurité alimentaire dans les régions sahariennes d'Algérie, notamment en rotation avec des cultures traditionnelles comme le blé ou en sous-culture dans les palmeraies. Toutefois, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour affiner les itinéraires techniques, adapter les pratiques culturales et étendre les essais à d'autres régions sahariennes afin d'assurer la durabilité et la productivité de cette culture dans différents contextes agroclimatiques.



Références Bibliographiques

Références 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. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.06.012>
- Al Naggar, A. M. M., El Salam, R. A., Badran, A. E. E., & El Moghazi, M. M. (2017). Effets du génotype et de la sécheresse sur les caractéristiques morphologiques, physiologiques et de rendement du quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Asian Journal of Advanced Agricultural Research*, 3(1), 1–15. <https://doi.org/10.9734/ajaar/2017/36655>
- Alandia, L., & Blajos, J. (2011). Chapter 7: Expansion of quinoa cultivation to countries outside the Andean region. In *Quinoa: An Ancient Crop to Contribute to World Food Security* (pp. 43–45). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/aq287e/aq287e.pdf>
- Alandia, L., Rodriguez, J. P., Jacobsen, S. E., Bazile, D., & Condori, B. (2020). Global expansion of quinoa and challenges for the Andean region. *Global Food Security*, 26, 100429. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100429>
- Alvar-Beltrán, J., Verdi, L., Marta, A. D., Dao, A., Vivoli, R., Sanou, J., & Orlandini, S. (2020). The effect of heat stress on quinoa (cv. Titicaca) under controlled climatic conditions. *Journal of Agricultural Science*, 158, 255–261. <https://doi.org/10.1017/S002185962000007X>
- Auza, J. I. (2003). *Curvas de crecimiento de quinua (Chenopodium quinoa Willd.) y avena (Avena sativa) en condiciones diferenciadas de alimentación hídrica y nutrición nitrogenada en la Estación de Choquenaira*. Universidad Mayor de San Andrés.
- Ayala, G., Ortega, L., & Moron, C. (2001). Valor nutritivo y usos de la quinua. In A. Mujica, S. E. Jacobsen, J. Izquierdo, J. P. Marathe, & FAO (Éds.), *Quinoa (Chenopodium quinoa Willd.): ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro*. CIP, UNAP.
- Bazile, D., & Baudron, F. (2015). The dynamics of the global expansion of quinoa growing in view of its high biodiversity. In D. Bazile, H. D. Bertero, & C. Nieto (Éds.), *State of the Art Report on Quinoa around the World in 2013* (pp. 42–55). FAO. http://www.fao.org/quinoa-2013/publications/detail/en/item/278923/icode/?no_mobile=1
- Bazile, D., Jacobsen, S. E., & Verniau, A. (2016). The global expansion of quinoa: Trends and limits. *Frontiers in Plant Science*, 7, 622. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00622>
- Bazile, D., Bertero, H. D., & Nieto, C. (2015). *State of the Art Report on Quinoa around the World in 2013*. FAO ; Santiago, Chile; CIRAD: Montpellier, France, p. 603.
- Bazile, D., Pulvento, C., Verniau, A., Al-Nusairi, M. S., Ba, D., Breidy, J., Hassan, L., Mohammed, M. I., Mambetov, O., Otambekova, M., et al. (2016a). Worldwide evaluations of quinoa: Preliminary results from post international year of quinoa FAO projects in nine countries. *Frontiers in Plant Science*, 7, 850. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00850>

- Benbrahim, F., Mohamed, B., Kemassi, A., Darem, S., Imade, H., CHikhi, F., Halilat, M. (2016) Evaluating the sustainability of grain production under pivot through the study of soil salinization in the region of Ouargla. *Cienc. E Tec. Vitivinic.*, 31, 107–123
- Bertero, D., Medan, D., & Hall, A. J. (1996). Changes in apical morphology during floral initiation and reproductive development in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Annals of Botany*, 78(3), 317–324. <https://doi.org/10.1006/anbo.1996.0125>
- Bertero, H., de La Vega, A., Correa, G., Jacobsen, S., & Mujica, A. (2004). Genotype and genotype-by-environment interaction effects for grain yield and grain size of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) as revealed by pattern analysis of international multi-environment trials. *Field Crops Research*, 89(2-3), 299–318. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.02.006>
- Bhargava, A., & Ohri, D. (2014). Chapter 6.2: Quinoa in the Indian subcontinent. In D. Bazile, D. Bertero, & C. Nieto (Éds.), *State of the Art Report on Quinoa around the World in 2013* (pp. 511–523). FAO ; CIRAD. <http://www.fao.org/3/a-i4042e.pdf>
- Bhargava, A., Shukla, S., & Ohri, D. (2007). Genetic variability and interrelationship among various morphological and quality traits in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Field Crops Research*, 101(1), 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.10.001>
- Bioversity International, FAO, PROINPA, INIAF, & FIDA. (2013). *Descriptores para quinua (Chenopodium quinoa Willd.) y sus parientes silvestres*. Bioversity International. Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola, Roma, Italia. ISBN: 978-92-9043-927-1
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.07.006>
- Bosque, S. H., Lemeur, R., Van Damme, P., & Jacobsen, S.-E. (2003). Ecophysiological analysis of drought and salinity stress of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Reviews International*, 19(1-2), 111–119. <https://doi.org/10.1081/FRI-120020614>
- Bruno, M. & Whitehead, W. (2003). Chenopodium Cultivation and Formative Period Agriculture at Chiripa, Bolivia. *Latin American Antiquity*, 14, 339-355.
- Canahua, A. & Rea, J. (1979). Quinuas resistentes a heladas. In: *II Congreso Internacional de Cultivos Andinos, junio 4-8*. IICA. Riobamba, Ecuador. pp. 14-35.
- Cardozo, A. & Tapia, M.E. (1979). Valor nutritivo. In M.E. Tapia (Éd.), *Quinua y Kaniwa. Cultivos Andinos*. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. (Vol. 49, pp. 149-192)
- Catacora, P. & Canahua, A. (1992). Selección de genotipos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) resistentes a heladas y perspectivas de producción en camellones. *Actas del VII Congreso Internacional sobre Cultivos Andinos*. La Paz, Bolivia. pp. 53-56.
- CDARS. (1999). Phase 5: Analyse des contraintes. In *Étude du Schéma Directeur Général du Développement des Régions Sahariennes* (p. 56). CDARS.

- Chauhan, G.S., Eskin, N.A.M., & Tkachuk, R. (1992). Nutrients and antinutrients in quinoa seed. *Cereal Chemistry*, 69, 85-88.
- Coronado, A.C.M., Castro, M.A., & Hernandez, E.H.M. (2023). Interpopulation characterization of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) from different agroecological environments of Colombia. *Braz J Biol*, 83(3), 806. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.271954>
- Craine, E.B., Davies, A., Packer, D., Miller, N.D., Schmöckel, S.M., Spalding, E.P., et al. (2023). A comprehensive characterization of agronomic and end-use quality phenotypes across a quinoa world core collection. *Front Plant Sci*, 14, 1101547. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1101547>
- Cuzack, D. (1984). Quinoa: Grain of the Incas. *Ecologist*, 14, 21-31.
- Danielsen, S., Bonifacio, A. & Ames, T. (2003). Diseases of quinoa (*Chenopodium quinoa*). *Food Reviews International*, 19(1-2), 43-59.
- Danielsen, S., Jacobsen, S.E., Echegaray, J. & Ames, T. (1999). Impact du mildiou sur le rendement du quinoa. *CIP Program Report 1999–2000*, 397-401.
- Dini, I., Tenore, G.C. & Dini, A. (2004). Phenolic constituents of Kancolla seeds. *Food Chemistry*, 84, 163-168.
- Carmen, D.C., Mahy, G., & Winkel, T. (2008). La quinoa en Bolivie: une culture ancestrale devenue culture de rente “bio-équitable”. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 12, 421-435.
- Dizès, J. & Bonifacio, A. (1992). Estudio en microscopia electrónica de la morfología de los órganos de la quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) y de la cañihua (*Chenopodium pallidicaule* A.) en relación con la resistencia a la sequía. In: *Actas del VII Congreso Internacional sobre Cultivos Andinos* (pp. 69-74). IBTA/ORSTOM/CIID Canada.
- Durand, J.H. (1958). *Les sols irrigables. Etude pédologique*. Imbert.
- Espíndola, G. (1986). *Respuestas fisiológicas, morfológicas y agronómicas de la quinoa al déficit hídrico* [Thèse de Master non publiée]. Colegio de Post-graduados.
- Espíndola, G. (1992). Proyecto de fortalecimiento y modernización. In: *Informe anual 1992. Programa quinoa. Estación Experimental de Patacamaya* (pp. 37-42). IBTA-BM.
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2001). *Cultivos Andinos: Ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro*. (Mujica, A., Jacobsen, S.E., Izquierdo, J., & Marathe, J.P., Eds.). FAO.
- Feillet, P. (2000). *Le grain de blé, composition et utilisation*. Editions INRA.
- Felix, D. (2004). *Diagnostic Agraire de la province Daniel Campos, Bolivia: Le développement de la filière quinoa et ses conséquences sur l'équilibre du système agraire Aymara* [Mémoire]. Cnearc, Cicda, Ensam.

- Félix, D. (2008). *Culture durable du quinoa en Bolivie : pratiques individuelles et règles communautaires*. VSF-CICDA-Ruralter.
- Fick, S.E. & Hijmans, R.J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37, 4302-4315.
- Gallardo, M., Gonzalez, J.A., & Ponessa, G. (1997). Morfología del fruto y semilla de *Chenopodium quinoa* Willd (Quinoa). *Chenopodiaceae. Lilloa*, 39(1), 71-80.
- Galwey, N.W. (1992). The potential of quinoa as a multi-purpose crop for agricultural diversification: A review. *Industrial Crops and Products*, 1, 101-106.
- 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 Science and Nutrition*, 42F(4), 245-261.
- Gandarillas, H. (1968a). Caracteres botánicos más importantes para la clasificación de la quinua. In: *Anales de la Primera convención de Quenopodiáceas quinoa – cañahua* (pp. 41-49). Universidad Nacional Técnica del Altiplano.
- Gandarillas, H. (1968b). *Razas de quinua*. (Boletín Experimental N° 4). Ministerio de Agricultura. División de Investigaciones Agrícolas. Boletín Experimental N° 4, La Paz, Bolivia, p. 53.
- Gandarillas, H. (1979). Botánica. In M.E. Tapia et al. (Éds.), *La quinua y la kañiwa: cultivos andinos* (pp. 20-44). Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (CIID), Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA).
- Gandarillas, H. (1979b). La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.): Genética y origen. In M.E. Tapia et al. (Éds.), *La Quinua y la Kañiwa cultivos andinos* (pp. 45-64). CIID-IICA.
- Gandarillas, H. (1982). *El cultivo de la quinua*. Ministerio de Asuntos Campesinos y Agropecuarios, Instituto Boliviano de Tecnología Agropecuaria, Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo. La Paz, Bolivia. 22 p.
- Geerts, S., Mamani, R., Garcia, M. & Raes, D. (2006, 4-8 Avril). *Response of quinoa (Chenopodium Quinoa Willd) to differential drought stress in the bolivian Altiplano: towards a deficit irrigation strategy within a water scarce region*. Communication présentée au International Symposium on Water and Land Management for Sustainable Irrigated Agriculture, Adana, Turquie.
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Vacher, J.J., Mamani, R., Mendoza, J., Huanca, R., Morales, B., Miranda, R., Cusicanqui, J. & Taboada, C. (2008). Introducing deficit irrigation to stabilize yields of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *European Journal of Agronomy*, 28, 427-436.
- Gesinski, K. (2008). Evaluation of the development and yielding potential of *Chenopodium quinoa* Willd. Under the climatic conditions of Europe. *Acta Agrobot*, 61, 185-189.
- Giusti, L. (1970). El genero *Cenopodium* in Argentina 1: Numeros de cromosomas. *Darwiniana*, 16, 98-105.

- Granado-Rodríguez, S., Vilariño-Rodríguez, S., Maestro-Gaitán, I., Matías, J., Rodríguez, M.J. & Calvo, P. (2021). Genotype dependent variation of nutritional quality-related traits in quinoa seeds. *Plants*, 10(10), 2128. <https://doi.org/10.3390/plants10102128>
- Hariadi, Y., Marandon, K., Tian, Y., Jacobsen, S.-E. & Shabala, S. (2011). Ionic and osmotic relations in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) plant grown at various salinity levels. *Journal of Experimental Botany*, 62(1), 185-193.
- Harris, I.P., Jones, P.D., Osborn, T.J. & Lister, D.H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34, 623–642.
- Hinojosa, L., González, J. A., Barrios-Masias, F. H., Fuentes, F., & Murphy, K. M. (2018). Quinoa Abiotic Stress Responses: A Review. *Plants*, 7, 106. <https://doi.org/10.3390/plants7040106>
- Hirich, A., Choukr-Allah, R., & Jacobsen, S.-E. (2014). L'irrigation par déficit et le compost organique améliorent la croissance et le rendement du quinoa et pois. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 200, 390–398. <https://doi.org/10.1111/jac.12073>
- Hunziker, A.T. (1943). Los especies alimenticias de *Amaranthus* y *Chenopodium* cultivadas por los Indios de America. *Revista Argentina de Agronomía*, 30(4), 297-353.
- Hunziker, A.T. (1952). *Los pseudo cereales de la agricultura indígena de América*. Acme Agency, Buenos Aires. p. 1-104
- Hussain, M.I., Al-Dakheel, A.J., & Reigosa, M.J. (2018). Différences génotypiques dans les réponses agrophysiologiques, biochimiques et isotopiques au stress salin chez les plants de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) : perspectives de tolérance à la salinité et de stabilité du rendement. *Plant Physiology and Biochemistry*, 129, 411–420. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.06.023>
- Izquierdo Fernández, J.I., Mujica, A., Jacobsen, S.E., Marathée, J.P., & Morón, C. (2001). *Cultivos andinos* (Version 1.0). FAO.: <http://www.rlc.fao.org/es/agricultura/pubs.htm>
- Jacobsen, S.-E. (2003). The worldwide potential for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Reviews International*, 19(1-2), 167-177.
- Jacobsen, S.E., Monteros, C., & Christiansen, J.L., & Mujica, A. (2000). Agronomic and physiological response of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to frost at three phenological stages. In E. Commission (Ed.), *European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research* (pp. 541-546).
- Jacobsen, S.E., & Stolen, O. (1993). Quinoa – Morphology, phenology and prospects for its production as a new crop in Europe. *European Journal of Agronomy*, 2(1), 19-29.
- Jacobsen, S.E., Quispe, H., & Christiansen, J.L. (2000). What are the mechanisms responsible for salt tolerance in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)? In E. Commission (Ed.), *European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research* (pp. 511-516).

- Jacobsen, S.E., Quispe, H., & Mujica, A. (2001). Quinoa: an alternative crop for saline soils in the Andes. *CIP Report Program 1999-2000*, 403-408.
- Jacobsen, S.E. (2003). The worldwide potential for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Reviews International*, 19(1-2), 167-177.
- Jacobsen, S.E., Monteros, C., Christiansen, J., Bravo, L., Corcuera, L. & Mujica, A. (2005). Plant responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to frost at various phenological stages. *European Journal of Agronomy*, 22(2), 131-139.
- Jacobsen, S.E., Monteros, C., Corcuera, L., Bravo, L., Christiansen, J. & Mujica, A. (2007). Frost resistance mechanisms in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *European Journal of Agronomy*, 26(4), 471-475.
- Jannatul, N., Sheikh Mahfuja, K., Biswajit, D., Mumtarin Haque, M., Sadia, A., Masudur Reza, S., Habibul Bari, S., Kristina, T., & Mohammad Anwar, H. (2024). Phenotyping of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Genotypes for Morphological, Yield and Nutritional Quality Traits. *Phyton*, 93(12). <https://doi.org/10.32604/phyton.2024.058786>
- Jensen, C.R., Jacobsen, S.E., Andersen, M.N., Núñez, N., Andersen, S.D., Rasmussen, L., Mogensen, V.O. (2000). Leaf gas exchange and water relation characteristics of field quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) during soil drying. *European Journal of Agronomy*, 13, 11-25.
- Khadhraoui, A. (2006). *Water and Soil in Algeria*. Minsitry of Water Resources. Alger, Algeria, p. 391, ISBN 9947-0-1193-3.
- Khadhraoui, A. (2007). *Water and Environmental Impact in the Algerian Sahara Palm Grove of Temacine (Oued Rhir)*. CDARS. Alger, Algeria; p. 299, ISBN 978-9961-797-051.
- Kir, A.E. & Temel, S. (2016). Determination of seed yield and some agronomical characteristics of different quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) variety and populations under dry conditions of Iğdır Plain. *Iğdır University. Journal of Institute of Science and Technology*, 4(6), 145–154. <https://doi.org/10.21597/jist.2016624166>
- 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(1-2), 79-90.
- Kozioł, M.J. (1992). Chemical composition and nutritional evaluation of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Journal of Food Composition and Analysis*, 5, 35-68.
- Laguna, P. (2002). Competitividad, externalidades e internalidades, un reto para les organizaciones economicas campesinas: la inserción de la Asociación Nacional de Productores de Quinua en el mercado mundial de la quinua. *Debate Agrario*, 34, 95-169.
- Laki, E.S., Rabiei, B., Marashi, H., Jokarfard, V., & Börner, A. (2024). Association analysis of grain yield and yield components in Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) using SSR markers. *Scientific Reports*, 14, 5991. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56587-0>
- Lesjak, J. & Calderini, D.F. (2017). Increased Night Temperature Negatively Affects Grain Yield, Biomass and Grain Number in Chilean Quinoa. *Frontiers in Plant Science*, 8, 352.

- Maamri, K., Zidane, O.D., Chaabena, A., Fiene, G., & Bazile, D. (2022). Adaptation of Some Quinoa Genotypes (*Chenopodium quinoa* Willd.), Grown in a Saharan Climate in Algeria. *Life*, 12, 1854. <https://doi.org/10.3390/life12111854>
- Manugade, R.P., Hamane, G.M., & Bhalekar, N.B. (2023). Evaluation of different genotypes of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) for yield and yield contributing parameters. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(19), 783–787. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i193611>
- Martínez, E.A., Veas, E., Jorquera, C., San Martín, R., & Jara, P. (2009). Reintroduction of *Chenopodium quinoa* Willd. into arid Chile: cultivation of two lowland races under extremely low irrigation. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 195(1), 1-10.
- Maughan, P.J., Bonifacio, A., Coleman, E.C., Jellen, E.N., Stevens, M.R., & Fairbanks, D.J. (2007). Chapter 9: Quinoa (*Chenopodium quinoa*). In *Pulses, Sugar and Tuber Crops* (pp. 147–158). Springer.
- Mujica, A. (1979). Practicas agronómicas. In M.E. Tapia et al. (Éds.), *La quinua y la Kañiwa cultivos andinos* (pp. 91-92). CIID-IIICA.
- Mujica, A., & Canahua, A. (1989). Fases fenológicas del cultivo de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willdenow). In: *Curso Taller, Fenología de cultivos andinos y uso de la información agrometeorológica* (pp. 23-27). INIAA, EEZA-ILLPA, PICA, PISA.
- Mujica, A., Izquierdo, J., & Marathee, J.P. (2001). Origen y descripción de la quinua. In: A. Mujica et al. (Éds.), *Quinua (Chenopodium quinoa Willd.): ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro*. CIP, UNAP, FAO.
- Ng, S.C., Anderson, A., Coker, J., & Ondrus, M. (2007). Characterization of lipid oxidation products in quinoa (*Chenopodium quinoa*). *Food Chemistry*, 101, 185-192.
- Oustani, M., Mehda, S., Halilat, M.T., & Chenchouni, H. (2023). Yield, growth development and grain characteristics of seven quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes grown in open-field production systems under hot-arid climatic conditions. *Scientific Reports*, 13(1), 1-18. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29039-4>
- Pacheco, A. & Morlon, P. (1978). *Los sistemas radicluras de las plantas de interés económico en el Altiplano de Puno: un estudio preliminar*. Proyecto de Investigación y Mejoramiento de las condiciones de desarrollo de la Agricultura del Altiplano de Puno.
- Prego, I., Maldonado, S. & Otegui, M. (1998). Seed structure and localization of reserves in *Chenopodium quinoa*. *Annals of Botany*, 82(4), 481-488.
- Proinpa. (2008). [Site internet]. Consulté le 4 août 2025 à l'adresse <http://www.proinpa.org/>
- Pulvento, C., Riccardi, M., Lavini, A., D'Andria, R., Iafelice, G. & Marconi, E. (2010). Field Trial Evaluation of Two *Chenopodium quinoa* Genotypes Grown Under Rain-Fed Conditions in a Typical Mediterranean Environment in South Italy. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 196, 407–411.

- Quispe, J.I., Fernandez, C. & Cortes, G. (1976). Contribución al estudio morfológico del grano de quinua. In: *Segunda Convención Internacional de Quenopodiáceas*. Potosí, Bolivia.
- Rea, J. (1969). Morfología de la quinua. In: *Observaciones sobre la biología floral y estudios de saponinas en Chenopodium quinoa Willd.* Ministerio de Agricultura. Ministerio de Agricultura. Departamento de Experimentación. Serie Técnica N° 3. La Paz, Bolivia. pp. 15-17.
- Rea, J., Tapia, M.E. & Mujica, A. (1979). Prácticas agronómicas. In M.E. Tapia et al. (Éds.), *La Quinoa y la Kañiwa, cultivos andinos*. CIID-IICA. Bogota, Colombia. p. 83-120
- Repo-Carrasco, R., Espinoza, C. & Jacobsen, S.E. (2003). Nutritional value and use of the andean crops quinoa (*Chenopodium quinoa*) and Kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*). *Food Reviews International*, 19, 179–189.
- Richards, L. A. (1954). Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils, U. S. Department of Agriculture Handbook, Vol. 60, Washington D. C., (USA) 160 p
- Risi, C.J. & Galwey, N.W. (1984). The *Chenopodium* grains of the Andes: Inca crops for modern agriculture. *Advances in Applied Biology*, 10, 145-216.
- Risi, J. & Galwey, N.W. (1989). *Chenopodium* grains of the Andes: a crop for the temperate latitudes. In: G.E. Wickens, N. Haq & P. Dauby (Éds.), *New Crops for Food and Industry*. Chapman and Hall.
- Rojas, W. (2003). Multivariate analysis of genetic diversity of Bolivian quinoa germplasm. *FoodReviewsInternational*, 19(1–2), 9–23.
<https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1081/fri-120018864>
- Rojas, W., Pinto, M., Alanoca, C., Gomez Pando, L., Leon-Lobos, P., Alercia, A., Diulgheroff, S., Padulosi, S. & Bazile, D. (2015). Quinoa genetic resources and ex situ conservation. In D. Bazile, H.D. Bertero & C. Nieto (Éds.), *State of the art report on quinoa around the world in 2013*(pp.56-82).FAO.
http://www.fao.org/quinoa2013/publications/detail/en/item/278923/icode/?no_mobile=1
- Coronado, A. C. M., Hernández, E. H. M., & Coronado, Y. M. (2022). Phenotypic diversity of agromorphological characteristics of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) germplasm in Colombia. *Sciencia Agrícola*, 79(4), 1. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2021-0017>
- De Santis, G., D'Ambrosio, T., Rinaldi, M., & Rascio, A. (2016). Heritabilities of morphological and quality traits and interrelationships with yield in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes in the Mediterranean environment. *Journal of Cereal Science*, 70, 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.06.003>
- Sarwar, A. K. M. G., Khatun, M. M., & Fakir, M. S. A. (2023). Quinoa—a functional food crop: morphological descriptors. *Journal of Bangladesh Agricultural University*, 21(1), 12–22. <https://doi.org/10.5455/JBAU.141111>

- Schlick, G., & Budenheim, D. L. (1996). Quinoa: candidate crop for NASA's controlled ecological life support systems. In J. Janick (Ed.), *Progress in new crops* USA, Arlington (VA). (pp. 632-640).
- Shah, S. S., Shi, L., Li, Z., Ren, G., Zhou, B., & Qin, P. (2020). Yield, agronomic and forage quality traits of different quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes in Northeast China. *Agronomy*, 10(12), 1908. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121908>
- Shams, A. (2018). Évaluation préliminaire de nouveaux génotypes de quinoa dans des sols sablonneux en Égypte. *Agricultural Sciences*, 9, 1444–1456. <https://doi.org/10.4236/as.2018.911100>
- Spehar, C. R., & da Silva-Rocha, J. E. (2009). Effet de la densité de semis sur la croissance et le développement des plantes de quinoa, génotype 4.5, dans les hautes terres de la savane brésilienne. *Bioscience Journal*, 25(4), 53–58.
- Tan, M., & Temel, S. (2018). Performance de certains génotypes de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivés dans différentes conditions climatiques. *Turkish Journal of Field Crops*, 23(2), 180–186. <https://doi.org/10.17557/tjfc.485617>
- Tang, P., Ren, A., Jiang, Z., Wang, R., Cui, K., Wu, X., et al. (2024). Evaluation of quinoa varieties for adaptability and yield potential in low altitudes and correlation with agronomic traits. *Agronomy*, 14(4), 852. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040852>
- Tapia, M. E. (1997). *Cultivos andinos subexplotados y su aporte a la alimentación* (2e éd.). Santiago, Chile, FAO.
- Tapia, M. E. (2000). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro. In A. Mujica, S. E. Jacobsen, J. Izquierdo, J. P. Marathe, & FAO (Eds.), *Cultivos andinos, version 1.0*. CIP, UNAP, FAO.
- Tapia, M. E., Gandarillas, H., Alandia, S., Cardozo, A., Mujica, A., Ortiz, R., Otazu, V., Rea, J., Salas, B., & Zanabria, E. (Eds.). (1979). *La Quinoa y la Kañiwa, cultivos andinos*. Colombia, Bogota. 228p.
- The world ranking. (2023). *Quinoa harvest by country*. <https://www.theworldranking.com/statistics/1057/quinoa-area-harvested-bycountry/2297/>
- Valencia-Chamorro, S. A. (2003). Quinoa. In B. Cabalero (Ed.), *Encyclopedia of Food Science and Nutrition* (2e éd., Vol. 8, pp. 4895-4902). Academic Press.
- Wilson, H. D. (1990). Quinoa and Relatives (*Chenopodium* sect. *Chenopodium* subsect. *Cellulata*). *Economic Botany*, 44, 92-110.
- Wright, K. H., Pike, O. A., Fairbanks, D. J., & Huber, C. S. (2002). Composition of *Atriplex hortensis*, sweet and bitter *Chenopodium quinoa* seeds. *Journal of Food Science*, 67(4), 1383-1385.

Yang, A., Akhtar, S. S., Amjad, M., Iqbal, S., & Jacobsen, S.-E. (2016). Growth and Physiological Responses of Quinoa to Drought and Temperature Stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 202, 445–453.