

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DES SCIENCES
AGRONOMIQUES

N° : 14/ DSA/VCDPGR/2025



DOMAINE : SCIENCES DE LA NATURE
ET DE LA VIE

FILIERE : SCIENCES AGRONOMIQUES

OPTION : PRODUCTION VEGETELE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par :

BOUKHAROUBA Anis

MIHOUBI Oussama

Intitulé

**Culture de l'orge hors-sol pour la production
de fourrage vert**

Soutenu devant le jury composé de :

| | | | |
|-------------------------|-----|--------------------------------|---------------|
| M. CHERIEF Abdelkader | MAA | Université Med BOUDIAF- M'SILA | Président |
| M. HADJ KOUIDER Boubakr | MCA | Université Med BOUDIAF- M'SILA | Promoteur |
| Mme. LALLOUCHE Bahia | MCA | Université Med BOUDIAF- M'SILA | Co-promotrice |
| M. TORCHIT Nadir | MCB | Université Med BOUDIAF- M'SILA | Examineur |

Année universitaire : 2024/2025.

REMERCIEMENT

Nous remercions tout d'abord Allah, pour nous avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires à la réalisation de ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à Monsieur **HADJ KOUIDER Boubakr**, promoteur de ce mémoire, et à Madame **LALLOUCHE Bahia**, co-promotrice, pour avoir acceptés de diriger ce travail, pour leur encadrement rigoureux, leurs conseils éclairés, leur patience et leur accompagnement tout au long de ce parcours.

Nous remercions également Monsieur **CHERIEF Abdelkader**, président du jury, et Monsieur **TORCHIT Nadir**, examinateur, ainsi que la représentante de l'incubateur, et le partenaire économique, pour avoir accepté, de manière volontaire et généreuse, d'évaluer notre travail. Nous leur témoignons ici toute notre reconnaissance et notre respect.

إهداء

بسم الله الرحمن الرحيم، الحمد لله ربي العالمين، والصلاة و السلام على نبينا محمد اشرف الخلق والمرسلين...

إلى والديّ العزيزين، النور الذي أضاء لي درب العلم والحياة، والدعم الذي لا ينضب مهما اشتدت الظروف، لكم خالص الامتنان والمحبة، فأنتم أساس هذا الإنجاز وركيزته الأولى.

إلى إخوتي الكبار، الذين كانوا رفاق الرحلة ومصدر الإلهام، أقدر لكم وجودكم الذي جعل هذه المسيرة أكثر جمالاً وإشراقاً.

إلى أصدقائي الأعزاء، مبروك، طاهر، ضياء، لطفي، عاشور، أشرف، تاقى، فاتح، عبد المالك، سيف والقائمة تطول، وقفتم بجانبى في لحظات التعب وأيام السهر، كلماتكم، تشجيعكم، وثقتكم بي كانت دافعا لتجاوز كل الصعاب، لكم كل التقدير والامتنان.

وأخيراً، اهداء خاص إلى الأصدقاء الأعزاء رفقاء الدرب في التخصص: كمال، عبدو، علي، أسامة ومحمد، إن كلمات الشكر تقف عاجزة أمام ما قدمتموه لي من دعم، وما منحنتموني من طاقة إيجابية كانت وقوداً للاستمرار والمضي قدماً.

بوخروبة. أ

إهداء

بسم الله الرحمن الرحيم، الحمد لله ربي العالمين، والصلاة و السلام على نبينا محمد اشرف الخلق والمرسلين . اما بعد اتقدم بجزيل الشكر لعائلتي اشكر أُمي التي ساندتني في دراستي و اشكر ابي و اسأل الله ان يرحمه كان حلمه ان يراني ناجحا ، اشكر اساتذتي بدون استثناء راجيا من الله ان يسعدهم و أن يجزيهم خيرا على تعليمهم لنا كنتم بمثابة الاءاء والامهات.
اشكر كذلك زملائي و كل اصدقائي و كل من شجعني ولو كلمة طيبة.
شكرا.

ميهوبي. أ

ملخص

في سياق زراعي يتسم بندرة الموارد المائية، وتراجع خصوبة التربة، والاعتماد المتزايد على الأعلاف المستوردة، تستكشف هذه الدراسة زراعة الشعير (*Hordeum vulgare L.*) بنظام الزراعة المائية كبديل مستدام لإنتاج الأعلاف الخضراء.

تضمن العمل التجريبي تقييم تأثير عدة عوامل تقنية، منها كثافة البذر، وتكرار الري، ودرجة الحرارة المحيطة، على نمو وإنتاجية الشعير المزروع بدون تربة. أجريت التجارب في ظروف مضبوطة، مع ري يدوي للبذور، ومتابعة خلال فترة قصيرة تتراوح بين 10 و17 يومًا.

كانت كفاءة إنبات البذور مرتفعة جدًا منذ البداية، حيث بلغ متوسط الإنبات 96.7% خلال أقل من 36 ساعة، مع نمو ممتاز للسيقان وتطور جيد للجذور.

أظهرت التحليلات الإحصائية لبيانات النمو فروقًا معنوية في أداء الإنبات حسب كثافة البذر المدروسة. تراوحت نتائج النمو والوزن الطازج تحت درجة حرارة متوسطة بين 20 و23 درجة مئوية بين 185 و235 غرامًا لكثافة 30 غ/سم² بطول إجمالي 23 سم، و235 و250 غرامًا لكثافة 40 غ/سم² بطول 21 سم، و250 و289 غرامًا لكثافة 50 غ/سم² بطول 17 سم، وأخيرًا 289 غرامًا لكثافة 60 غ/سم² بطول 15 سم.

أظهرت تجارب أخرى ضعف أداء الإنبات في ظروف حرارة مرتفعة نسبيًا وري مفرط، حيث أدت الحرارة العالية إلى إعاقة النمو ووفاة مبكرة للبراعم، بينما تسبب الري الزائد بتعفنات كبيرة أثرت سلبًا على النمو والإنبات.

أثبتت النتائج أن كثافة البذر 40 غ/سم² مع ري محدود ودرجة حرارة متوسطة بين 20 و23 درجة مئوية، تحت إضاءة بيضاء لمدة 14 ساعة يوميًا، تتيح تحقيق أفضل إنتاج من حيث الوزن الطازج، مع نمو جيد للسيقان والجذور، ومردودية ممتازة تصل إلى ستة أضعاف وزن البذور الأولي.

سمحت هذه النتائج أيضًا بوضع تصور واضح لوحدة إنتاج أعلاف خضراء تعتمد على زراعة الشعير بنظام الزراعة المائية.

الكلمات المفتاحية:

زراعة بدون تربة، استنبات الشعير، أعلاف خضراء، الري المحدود، الأمن الغذائي الحيواني، إنتاج محلي.

ABSTRACT

In an agricultural context marked by the scarcity of water resources, declining soil fertility, and increasing dependence on imported livestock feed, this study explores the hydroponic cultivation of barley (*Hordeum vulgare* L.) as a sustainable alternative for green fodder production.

The experimental work consisted of evaluating the effect of various technical parameters—namely seeding density, irrigation frequency, and ambient temperature—on the growth and yield of soilless cultivated barley fodder. The trials were conducted under controlled conditions, with manually irrigated seedlings observed over a short cycle of 10 to 17 days.

From the outset, the seed germination capacity was very high, averaging 96.7% in less than 36 hours, accompanied by excellent stem growth and root development.

Statistical analyses of growth data revealed significant differences in germination performance according to the seeding densities studied. Thus, growth and fresh weight results under an average temperature of 20 to 23 °C ranged from 185 g for a density of 30 g/150 cm² with a total height of 23 cm, to 235 g for 40 g/150 cm² with a height of 21 cm, 250 g for 50 g/150 cm² with a height of 17 cm, and finally 289 g for 60 g/150 cm² with a height of 15 cm.

Other experiments showed poor germination performance under relatively high temperature and excessive watering conditions. The former hindered growth and caused premature seedling death, while the latter caused significant rotting that severely compromised growth and germination.

The results showed that a density of 40 g/150 cm² combined with minimal irrigation and an average temperature of 20 to 23 °C under white light for 14 hours per day allowed optimal fresh matter yield, with good stem and root development, achieving an excellent yield up to six times the initial seed weight.

These results also enabled the creation of a clear vision for a green fodder production unit based on hydroponic barley cultivation.

Keywords:

Soilless cultivation, barley sprouting, green fodder, limited irrigation, livestock food security, local production

RÉSUMÉ

Dans un contexte agricole marqué par la raréfaction des ressources en eau, la baisse de la fertilité des sols et la dépendance croissante aux aliments pour bétail importés, la présente étude explore la culture hydroponique de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) comme alternative durable pour la production de fourrage vert.

Le travail expérimental a consisté à évaluer l'effet de différents paramètres techniques – notamment la densité de semis, la fréquence d'irrigation et la température ambiante – sur la croissance et le rendement du fourrage d'orge cultivé sans sol. Les essais ont été réalisés en conditions contrôlées, avec des semis irrigués manuellement et observés sur un cycle court de 10 à 17 jours.

Dès le départ, la capacité de germination des graines a été très élevée, atteignant en moyenne 96,7 % en moins de 36 heures, accompagnée d'une excellente croissance des tiges et du développement des racines.

Les analyses statistiques des données de croissance ont révélé des différences significatives dans la performance de la germination selon les densités de semis étudiées. Ainsi, les résultats de la croissance et du poids frais sous une température moyenne de 20 à 23 °C variaient de 185 g pour une densité de 30 g/150 cm² avec une hauteur totale de 23 cm, à 235 g pour 40 g/150 cm² avec une hauteur de 21 cm, 250 g pour 50 g/150 cm² avec une hauteur de 17 cm, et enfin 289 g pour 60 g/150 cm² avec une hauteur de 15 cm.

D'autres expériences ont montré une faible performance de germination dans des conditions de température relativement élevée et d'arrosage excessif. La première condition a entravé la croissance et causé une mort prématurée des germes, tandis que la seconde a provoqué des pourritures importantes qui ont fortement compromis la croissance et la germination.

Les résultats ont montré que la densité de 40 g/150 cm² combinée à une irrigation minimale et une température moyenne de 20 à 23 °C et sous lumière blanche pendant 14 heures par jour permettait d'obtenir un rendement optimal en matière fraîche, avec un bon développement des tiges et des racines, avec un rendement excellent atteignant jusqu'à 6 fois le poids initial des graines.

Ces résultats ont également permis de créer une vision claire pour une unité de production de fourrage vert à base d'orge hydroponique.

Mots-clés :

Culture hors-sol, germination de l'orge, fourrage vert, irrigation minimale, sécurité alimentaire animale, production locale

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENT

RESUME

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES.

LISTES DES FIGURES.

LISTES DES TABLEAUX.

INTRODUCTION..... 1

Chapitre I : La culture hors-sol concepts et techniques.

| | | |
|---------|--|---|
| I.1 | Définition et historique..... | 2 |
| I.2 | Les différents systèmes de culture hors-sol..... | 3 |
| I.2.1 | Les systèmes de culture hydroponique..... | 5 |
| I.2.1.1 | La culture en eau profonde..... | 5 |
| I.2.1.2 | La technique du film nutritif..... | 5 |
| I.2.1.3 | L'aéroponie..... | 5 |
| I.2.1.4 | La culture flottante..... | 6 |
| I.2.2 | Les systèmes de culture sur substrat..... | 6 |
| I.2.2.1 | La culture en sacs..... | 7 |
| I.2.2.2 | La culture en conteneurs..... | 7 |
| I.2.2.3 | La culture en rigoles..... | 7 |
| I.3 | Avantages de la culture hors-sol..... | 7 |
| I.3.1 | Contrôle précis des nutriments..... | 7 |
| I.3.2 | Réduction des maladies et des parasites..... | 7 |
| I.3.3 | Efficacité hydrique..... | 8 |
| I.3.3 | Adaptabilité à différents environnements..... | 8 |
| I.3.4 | Augmentation des rendements et de la qualité des produits..... | 8 |
| I.4 | Inconvénients de la culture hors-sol..... | 8 |
| I.4.1 | Coûts initiaux élevés..... | 8 |
| I.4.2 | Connaissances techniques requises..... | 8 |
| I.4.3 | Risque de propagation rapide des maladies..... | 9 |
| I.4.4 | Dépendance énergétique..... | 9 |
| I.4.5 | Problèmes liés aux substrats..... | 9 |
| I.5 | Applications pratiques et perspectives..... | 9 |

Chapitre II : caractéristiques et importance de l'orge.

| | | |
|----------|--|----|
| II.1 | Généralité et historique..... | 10 |
| II.2 | Classification botanique et description générale..... | 11 |
| II.2.1 | Nom scientifique et classification botanique..... | 11 |
| II.2.2 | Origine et distribution géographique..... | 12 |
| II.2.3 | Caractéristiques morphologiques (racine, tige, feuilles, fleurs, graines)..... | 13 |
| II.3 | Exigences environnementales pour la culture de l'orge..... | 14 |
| II.3.1 | Type de sol idéal..... | 14 |
| II.3.2 | Besoins climatiques (température, lumière, précipitations)..... | 14 |
| II.3.2.1 | Température..... | 14 |
| II.3.2.2 | Besoins en eau..... | 14 |
| II.3.2.3 | Photopériode..... | 15 |
| II.3.2.4 | Facteurs limitants principaux..... | 15 |
| II.3.2.5 | Adaptation aux différentes zones agro-écologiques en Algérie..... | 15 |
| II.4 | Cycle agricole et méthodes de culture..... | 15 |
| II.4.1 | Périodes optimales de semis..... | 15 |
| II.4.2 | Méthodes de semis..... | 16 |
| II.4.3 | Irrigation..... | 16 |
| II.4.4 | Fertilisation..... | 17 |
| II.5 | Phases de croissance de l'orge..... | 17 |
| II.5.1 | Germination et stade plantule..... | 17 |
| II.5.2 | Croissance végétative..... | 17 |
| II.5.3 | Floraison et fructification..... | 18 |
| II.5.4 | Maturation et récolte..... | 18 |
| II.5.5 | Cycle de développement..... | 18 |
| II.6 | Utilisations de l'orge..... | 19 |
| II.6.1 | L'orge comme fourrage..... | 19 |
| II.6.1.1 | Avantages nutritionnels..... | 19 |
| II.6.1.2 | Limitations..... | 19 |
| II.6.2 | L'orge dans l'alimentation humaine..... | 19 |
| II.6.3 | L'orge dans l'industrie..... | 20 |

Chapitre III : la production de fourrage vert

| | | |
|-------|--|----|
| III.1 | Définition et importance du fourrage vert..... | 21 |
| III.1 | Définition du fourrage vert..... | 21 |

| | | |
|------------|---|----|
| III.1.1.1 | Caractéristiques principaux..... | 21 |
| III.1.1.2 | Classification des fourrages verts..... | 21 |
| III.1.1.3 | Importance dans le contexte algérien..... | 21 |
| III.1.2 | Rôle dans l'alimentation animale..... | 22 |
| III.1.2. 1 | Avantages nutritionnels..... | 23 |
| III.2 | L'orge hydroponique fourragère : un cas emblématique..... | 23 |
| III.2.1 | Valeur nutritive..... | 23 |
| III.2.2. | Avantages nutritionnels..... | 24 |
| III.2.3 | Performances zootechniques..... | 24 |
| III.3. | Les méthodes traditionnelles de production..... | 24 |
| III.3.1 | Techniques de base..... | 24 |
| III.3.2 | Espèces traditionnellement cultivées..... | 25 |
| III.3.2.1 | Graminées..... | 25 |
| III.3.2.2 | Légumineuses..... | 25 |
| III.3.3 | Calendrier cultural..... | 25 |
| III.3.3.1 | Période de semis..... | 25 |
| III.3.3.1 | Récolte..... | 25 |
| III.4 | Les défis liés à la production de fourrage..... | 25 |
| III.4.1 | Contraintes climatiques et environnementales..... | 25 |
| III.4.1.1 | Stress hydrique..... | 25 |
| III.4.1.2. | Dégradation des sols..... | 25 |
| III.4.1.3 | Variabilité climatique..... | 25 |
| III.4.2 | Contraintes techniques..... | 25 |
| III.4.2.1. | Mauvaise gestion culturale..... | 25 |
| III.4.2.2 | Problèmes sanitaires..... | 25 |
| III.4.2.3 | Manque d'équipement..... | 26 |
| III.4.3 | Contraintes économiques..... | 26 |
| III.4.3.1 | Coûts de production élevés..... | 26 |
| III.4.3.2 | Rentabilité limitée..... | 26 |
| III.4.3.3 | Dépendance aux importations..... | 26 |
| III.4.4 | Contraintes structurelles..... | 26 |
| III.4.4. 1 | Accès à la terre..... | 26 |
| III.4.4. 2 | Manque de formation | 26 |
| III.4.4. 3 | Problèmes de commercialisation..... | 26 |

Chapitre IV : Synthèse de Littérature

| | | |
|--------|--|----|
| IV.1 | Introduction..... | 27 |
| IV.2 | Analyse Critique des Études Antérieures..... | 27 |
| IV.2.1 | Efficacité des Ressources..... | 27 |
| IV.2.2 | Qualité Nutritionnelle..... | 27 |
| IV.2.3 | Défis Pratiques..... | 27 |
| IV.3 | Lacunes dans la Recherche..... | 28 |
| IV.4 | Contributions de Cette Étude..... | 28 |
| IV.5 | Conclusion..... | 28 |

Chapitre V : Matériels et méthodes.

| | | |
|-----------|--|----|
| V.1. | Dispositif expérimental..... | 29 |
| V.1.1 | Système de culture hors-sol..... | 30 |
| V.1.2 | Conditions environnementales..... | 30 |
| V.1.3. | Matériel et équipements..... | 31 |
| V.2 | Préparation des grains..... | 33 |
| V.3 | Variété d'orge utilisée..... | 34 |
| V.4 | Expériences réalisées..... | 35 |
| V.4.1 | Expérience 1 : Taux de germination..... | 35 |
| V.4.2 | Influence de la densité de semis et les quantités minimales d'irrigation sur le rendement en fourrage vert..... | 35 |
| V.4.2.1 | Expérience 2 : Influence de la densité de semis et les quantités minimales d'irrigation sur le rendement en fourrage vert..... | 35 |
| V.4.2.2 | Expérience 3 : Influence de la densité de semis et les quantités doubles d'irrigation sur le rendement en fourrage vert..... | 36 |
| V.4.3 | Analyse comparative des essais en boîtes multiples (densités 40 g et 50 g)..... | 36 |
| V.4.4 | Expérience 4 : Effet de la température élevée (en serre)..... | 37 |
| V.5 | Paramètres mesurés..... | 37 |
| V.6 | Collecte et analyse des données..... | 37 |
| V.6.1 | Méthodologie de collecte..... | 37 |
| V.6.1 | Traitement et analyse des données..... | 38 |
| V.6.1.1 | Méthodes de traitement des données..... | 38 |
| V.6.1.2 | Approche statistique et tests appliqués..... | 38 |
| V.6.1.2.3 | Outils et logiciels utilisés..... | 38 |

Chapitre VI : Resultats et discussion

| | | |
|------|---|----|
| VI.1 | Taux de germination des graines d'orge..... | 40 |
|------|---|----|

| | |
|---|-----------|
| VI.1.1 La présentation des données..... | 40 |
| VI.1.2 Discussion..... | 42 |
| VI.2 Effet de la densité de plantation et de la quantité d'irrigation sur le poids de croissance et la longueur de l'orge hydroponique..... | 43 |
| VI.2.1 Expérimentez la germination de différentes densités de graines d'orge avec des quantités d'irrigation minimales suffisantes pour humidifier les graines..... | 43 |
| VI.2.1.1 La présentation des données..... | 43 |
| VI.2.1.2 Discussion..... | 46 |
| VI.2.2. Expérimentation de culture d'orge hydroponiaque avec des quantités d'irrigation doubles..... | 49 |
| VI.2.2.1 La présentation des données..... | 49 |
| VI.2.2.2 Discussion..... | 51 |
| VI.3 Analyse comparative des essais en boîtes multiples (densités 40 g et 50 g)..... | 52 |
| VI.3.1 Résultats statistiques : poids frais, écart-type et homogénéité..... | 54 |
| VI.4 Effet des conditions environnementales sur la croissance de l'orge germée..... | 56 |
| VI.4.1 Présentation des données..... | 56 |
| VI.3.2 Analyse comparative..... | 57 |
| VI.3.3 Discussion..... | 57 |
| VI.5 Recommandations pour l'optimisation d'une unité de production d'orge hydroponique..... | 58 |
| 4.1 Synthèse des résultats expérimentaux..... | 58 |
| VI.5.2 Conception d'une unité améliorée de production de fourrage vert d'orge hors-sol dans une salle de culture de 4 m x 9 m x 3 m..... | 59 |
| VI.5.2.1 Aménagement spatial et étagères de culture..... | 59 |
| VI.5.2.2 Densité de semis recommandée..... | 59 |
| VI.5.2.3 Système d'irrigation en circuit fermé..... | 59 |
| VI.5.2.4 Éclairage horticole..... | 60 |
| VI.5.2.5 Conditions climatiques..... | 60 |
| CONCLUSION GENERALE | |
| CONCLUSION GENERALE..... | 61 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | 63 |

LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES

| Abréviation | Terme complet (français) | Signification / Usage |
|----------------------------|--|---|
| AJR | Apport Journalier Recommandé | Quantité recommandée d'un nutriment par jour |
| ANOVA | Analyse de la Variance | Méthode statistique pour comparer des groupes |
| av. J.-C. | Avant Jésus-Christ | Référence chronologique historique |
| cm / cm² | centimètre / centimètre carré | Unités de longueur et de surface |
| EC | Electrical Conductivity (Conductivité Électrique) | Mesure de la salinité de la solution nutritive |
| g | gramme | Unité de masse |
| GMQ | Gain Moyen Quotidien | Indicateur de performance zootechnique (g/jour) |
| ha | hectare | Unité de surface agricole (10 000 m ²) |
| INRA | Institut National de la Recherche Agronomique | Organisme algérien de recherche agricole |
| LED | Light-Emitting Diode | Source d'éclairage à faible consommation |
| LMT | Longueur Moyenne des Tiges | Mesure de croissance aérienne |
| LMR | Longueur Moyenne des Racines | Mesure de croissance racinaire |
| MAT | Matière Azotée Totale | Indicateur de la teneur en protéines |
| ml | millilitre | Unité de volume |
| MO | Matière Organique | Composante organique du substrat ou sol |
| MS | Matière Sèche | Base de calcul pour les analyses nutritionnelles |
| NFT | Nutrient Film Technique | Technique hydroponique à film nutritif mince |
| OXFAM | Oxford Committee for Famine Relief | ONG internationale de développement agricole |
| pH | Potentiel Hydrogène | Mesure d'acidité ou de basicité |
| Qx | quintal | Unité de masse agricole (1 Qx = 100 kg) |
| SOD | Superoxyde Dismutase | Enzyme antioxydante naturelle |
| Tukey | Test de Tukey HSD | Test statistique post-ANOVA |
| U/g | Unités par gramme | Utilisé pour doser enzymes ou substances actives |
| % | pourcentage | Pour les proportions |
| °C | degré Celsius | Unité de température |

LISTES DES FIGURES

| Figures | Titre..... | Page |
|--------------------|--|-------------|
| Figure I.1 | Les jardin suspendus de Babylon..... | 3 |
| Figure I.2 | Culture en eau profonde..... | 5 |
| Figure I.3 | Culture hors sol NFT..... | 6 |
| Figure I.4 | Le système aéroponique..... | 6 |
| Figure I.5 | La culture flottante..... | 6 |
| Figure I.6 | Quelques types de milieux communs utilisés dans les systèmes de culture hors-sol..... | 7 |
| Figure II.1 | Orge 2 rangs et orge 6 rangs..... | 11 |
| Figure II.2 | Orges nues et orges barbues..... | 12 |
| Figure II.3 | Orge nue et Orge vêtue..... | 14 |
| Figure II.4 | Cycle de développement de l'orge..... | 19 |
| Figure V.1 | Structure de méthodologie de travail et expériences..... | 29 |
| Figure V.2 | Les boîtes utilisées pour les expériences..... | 30 |
| Figure V.3 | La serre utilisée..... | 31 |
| Figure V.4 | Récipients en plastique..... | 31 |
| Figure V.5 | Boîtes de germination (10x15x6 cm) | 31 |
| Figure V.6 | Boîtes de germination (10x5x2 cm) | 32 |
| Figure V.7 | Pulvérisateur manuel..... | 32 |
| Figure V.8 | Balance électronique..... | 32 |
| Figure V.9 | Outils de la mesure..... | 32 |
| Figure V.10 | Lampe LED de 12W..... | 33 |
| Figure V.11 | Graines en phase de lavage et de désinfection..... | 34 |
| Figure V.12 | Le processus d'égouttage des graines pré-pesées et trempées..... | 34 |
| Figure V.13 | Distribution des graines dans les boîtes..... | 34 |
| Figure V.14 | L'orge locale Tichedrit..... | 34 |
| Figure V.15 | Un test de taux de germination en cours de préparation..... | 35 |
| Figure V.16 | Expérience 2 : Influence de la densité de semis et les quantités minimales d'irrigation..... | 36 |
| Figure V.17 | Boîtes avec 40g d'orge..... | 37 |

| | | |
|---------------------|--|----|
| Figure VI.1 | L'état des graines dans chaque boîte après 36 heures de germination, et l'état atteint par la boîte A après 7 jours de surveillance..... | 41 |
| Figure VI.2 | Courbes graphiques de l'évolution du nombre de graines germées en fonction du temps..... | 42 |
| Figure VI.3 | Graine d'orge germée après 6 heures de trempage..... | 42 |
| Figure VI.4 | Graine d'orge germée après 18 heures de trempage..... | 43 |
| Figure VI.4 | Résultats de la culture de l'orge hors sol pour différentes densités et quantités minimales d'irrigation dqs le jour 15..... | 44 |
| Figure VI.5 | Orge avec des poids initiaux différents le premier jour..... | 45 |
| Figure VI.6 | Evolution du poids moyen pour chaque densité de semis en fonction du temps (jour)..... | 45 |
| Figure VI.7 | Comparaison des différences moyennes (test de Tukey) – jour 12 et 17..... | 48 |
| Figure VI.8 | Le jaunissement des feuilles apparaît dans les boîtes de culture de graines d'orge de 60 g..... | 49 |
| Figure VI.9 | Evolution du poids moyen pour chaque densité de semis en fonction du temps (jours)..... | 50 |
| Figure VI.10 | Pourriture des racines due à un arrosage excessif..... | 51 |
| Figure VI.11 | Orge hydroponique, irriguée avec des quantités d'irrigation doubles..... | 51 |
| Figure VI.9 | Une boîte de répétitions de culture de 40 g d'orge dans le jour 12..... | 53 |
| Figure VI.10 | Une boîte de répétitions de culture de 50 g d'orge dans le jour 15..... | 54 |
| Figure VI.11 | Homogénéité de croissance de l'orge hydroponique cultivée à une densité de 40 grammes par 150 cm ² | 54 |
| Figure VI.12 | Trois différentes boîtes d'orge cultivées sous serre au jour 4..... | 57 |

LISTES DES TABLEAUX

| Tableaux | Titre..... | P |
|----------------------|--|-----------|
| Tableau II.1 | Comparaison des types d'orge selon leur tolérance thermique..... | 14 |
| Tableau II.2 | Adaptation de l'orge aux zones agricoles algériennes..... | 15 |
| Tableau II.3 | Besoins en Fertilisation de l'Orge. | 17 |
| Tableau III.1 | Superficies et production des fourrages exploités en vert ou ensilés..... | 22 |
| Tableau III.2 | Profil nutritionnel de l'orge hydroponique (pour 100g de matière sèche). | 24 |
| Tableau III.3 | Comparaison des valeurs nutritives entre orge hydroponique et conventionnelle. | 24 |
| Tableau III.4 | Effets de l'orge hydroponique sur les ruminants..... | 24 |
| Tableau VI.1 | Nombre de graines germées dans la boîte 1. | 40 |
| Tableau VI.2 | Nombre de graines germées dans la boîte 2. | 40 |
| Tableau VI.3 | Nombre de graines germées dans la boîte 3. | 40 |
| Tableau VI.4 | L'analyse quantitative des trois tableaux de test de germination..... | 41 |
| Tableau VI.5 | Évolution quotidienne du poids frais de l'orge germée et irriguée avec des quantités minimales d'eau selon les densités de semis..... | 44 |
| Tableau VI.6 | Montre le poids frais total (grammes) après 12 jours. | 46 |
| Tableau VI.7 | Montre le croissance longitudinale (jour 12) | 46 |
| Tableau VI.8 | Résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) de l'évolution quotidienne du poids frais de l'orge germée selon différentes densités de semi..... | 47 |
| Tableau VI.9 | Évolution quotidienne du poids de l'orge germée et irriguée avec une quantité double d'irrigation selon les densités de semis..... | 49 |

| | | |
|----------------------|--|-----------|
| Tableau VI.10 | Évolution du poids de l'orge germée – Densité 40g/150 cm ² – 10 boîtes – T° : 20–23°C. | 52 |
| Tableau VI.11 | Évolution du poids frais de l'orge hydroponique – Densité 50g/150 cm ² – 10 boîtes – T° : 20–23°C. | 53 |
| Tableau VI.12 | Résultats du test T pour échantillons indépendants comparant le poids frais quotidien de l'orge germée entre les densités de semis 40g/150cm ² et 50g/150cm | 55 |
| Tableau VI.13 | L'évolution du poids frais quotidien des dix réplicats avec une densité initiale de 40 g/150cm ² de graines d'orge dans une serre à température constante de 32 à 34 °C. | 57 |
| Tableau VI.14 | Analyse du poids moyen. | 58 |
| Tableau VI.15 | Effet de la température sur la croissance de l'orge germée (densité 40 g/150 cm ²). | 57 |

INTRODUCTION

INTRODUCTION

L'agriculture occupe une place fondamentale dans la sécurité alimentaire mondiale, notamment dans les régions à ressources limitées. Elle constitue un pilier stratégique pour plusieurs secteurs clés tels que l'alimentation, l'industrie et la production de fourrage. Dans ce dernier domaine, l'orge (*Hordeum vulgare L.*) se distingue comme l'une des cultures les plus importantes en raison de sa valeur nutritive et de sa capacité d'adaptation à des conditions climatiques variées (Boulechfar, 2018). Toutefois, sa culture traditionnelle dépend fortement des ressources en sol et en eau, qui se raréfient face aux changements climatiques et à l'urbanisation croissante (Boulechfar, 2018 ; Mirallès-Bruneau, 2015).

Dans ce contexte, la culture hydroponique d'orge se présente comme une alternative durable. Elle permet une production rapide de fourrage vert (7 à 12 jours), sans sol, en utilisant un apport optimisé en eau et en nutriments (INRAN/Projet FVH OXFAM-Niger, 2020). Cette méthode consomme jusqu'à 200 fois moins d'eau que la culture en plein champ, un avantage majeur dans les zones arides (Mirallès-Bruneau, 2015).

En plus de son efficacité hydrique, l'hydroponie offre un rendement élevé, une qualité nutritionnelle supérieure (protéines, vitamines A et E, β -carotène, minéraux), et une production continue, indépendante des saisons (Ammari & Khelil, 2019). Elle contribue également à la réduction de l'empreinte écologique grâce à l'élimination du labour et à une moindre utilisation de pesticides (Boulechfar, 2018).

Problématique : Dans un contexte marqué par la raréfaction des ressources en eau, la dégradation des sols et la pression croissante sur les terres agricoles, la production de fourrages de qualité constitue un défi majeur pour les éleveurs. Bien que l'orge soit résiliente, sa culture traditionnelle reste soumise à de fortes contraintes climatiques. La culture hydroponique apparaît comme une alternative prometteuse, mais son efficacité réelle et ses conditions optimales d'application restent à valider localement.

Dès lors, la problématique centrale de ce travail est la suivante : Dans quelle mesure la culture hydroponique de l'orge permet-elle de produire un fourrage vert de qualité en un temps réduit, avec une consommation minimale d'eau, et quelles sont les conditions optimales (densité, température, irrigation) pour maximiser son rendement dans un système simplifié et reproductible ?

Hypothèses de travail :

- **H1** : Une densité de semis modérée permet un rendement en biomasse plus élevé qu'une densité trop faible ou excessive.
- **H2** : Une irrigation minimale est suffisante pour assurer une croissance optimale en hydroponie.
- **H3** : Des températures modérées (20–23 °C) favorisent davantage la croissance de l'orge hydroponique que des températures élevées (>30 °C).
- **H4** : Une durée de culture courte (10 à 12 jours) permet d'obtenir un bon compromis entre rendement et qualité nutritionnelle attendue.

Objectifs de l'étude :

- Évaluer l'effet de différentes densités de semis sur la croissance de l'orge en culture hydroponique.
- Tester l'impact de deux régimes d'irrigation (minimal et doublé) sur le rendement en poids frais.
- Étudier l'influence de la température ambiante sur le développement des pousses.
- Identifier les conditions optimales pour mettre en place une unité artisanale de production de fourrage vert à base d'orge germée, adaptée aux contraintes locales.

Ce travail vise ainsi à proposer une méthode simple, économique et reproductible de production de fourrage vert, accessible aux éleveurs dans les zones à ressources limitées.

Chapitre I : La culture hors- sol concepts et techniques.

CHAPITRE I

LA CULTURE HORS-SOL CONCEPTS ET TECHNIQUES.

I.1 Définition et historique

La culture hors-sol, également appelée culture hydroponique, est une méthode de production végétale qui ne repose pas sur l'utilisation du sol comme support de croissance. Elle consiste à cultiver des plantes dans un milieu reconstitué, souvent à base de substrats inertes ou dans des solutions nutritives, tout en fournissant aux racines les éléments essentiels à leur développement, tels que l'eau, les nutriments et l'oxygène (**Vitre, 2003**). Cette technique permet de contrôler précisément les conditions de croissance des plantes, ce qui en fait une solution adaptée à des environnements où la terre est absente ou de mauvaise qualité (**Roy, 2022**).

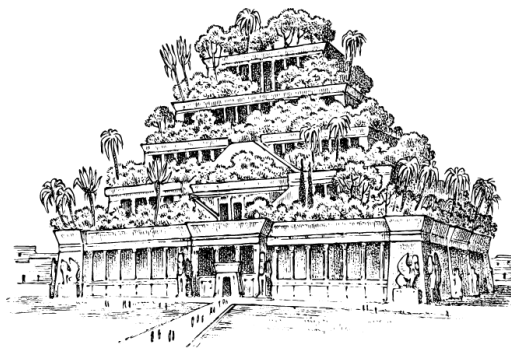


Figure I.1 : Les jardins suspendus de Babylone. (**Depositphotos, 2025**)

L'histoire de la culture hors-sol remonte à des siècles, avec des exemples anciens tels que les jardins suspendus de Babylone (**Figure 1**), considérés comme l'une des premières formes de culture sans sol. Ces jardins, construits vers 600 av. J.-C., utilisaient des systèmes d'irrigation sophistiqués pour cultiver des plantes sur des terrasses en pierre (**Tüzel et al., 2019**). De même, les Aztèques au Mexique ont développé des jardins flottants appelés "Chinampas", où les plantes poussaient sur des radeaux en bois recouverts de boue et de végétaux (**Tüzel et al., 2019**). Ces techniques démontrent que l'idée de cultiver des plantes sans sol n'est pas nouvelle, mais elle a évolué avec les avancées scientifiques et technologiques.

Les bases scientifiques de la culture hors-sol ont été établies au XVII^e siècle, lorsque des chercheurs comme **John Woodward** et **Francis Bacon** ont commencé à étudier la composition des plantes et les éléments nécessaires à leur croissance. **Woodward**, en **1699**, a mené des expériences pour comprendre comment les plantes absorbent les nutriments dans l'eau, marquant

ainsi les débuts de la recherche en hydroponie (**Vitre, 2003**). Cependant, ce n'est qu'au **XXe siècle** que cette technique a connu un essor significatif, notamment grâce aux travaux de **William Frederick Gericke**, qui a popularisé le terme "hydroponie" dans les années **1930** en cultivant des plantes dans des solutions nutritives (**Roy, 2022**). Gericke a réussi à faire pousser des tomates de plus de 7 mètres de haut en utilisant uniquement de l'eau et des nutriments, démontrant ainsi le potentiel de cette méthode pour une production agricole intensive (**Tüzel et al., 2019**).

Pendant la Seconde Guerre mondiale, l'armée américaine a utilisé la culture hors-sol pour produire des légumes dans des îles non arables du Pacifique, où les conditions climatiques et la qualité des sols rendaient l'agriculture traditionnelle impossible (**Tüzel et al., 2019**). Cette application pratique a montré que la culture hors-sol pouvait être une solution viable pour répondre aux besoins alimentaires dans des environnements difficiles. Après la guerre, l'intérêt pour cette technique a continué de croître, notamment dans les années 1960, avec l'introduction de la technique du film nutritif (NFT) au Royaume-Uni. Cette méthode, développée par Allen Cooper, permet de faire circuler un mince film de solution nutritive autour des racines des plantes, offrant ainsi une aération optimale et une absorption efficace des nutriments (**Tüzel et al., 2019**).

Parallèlement, au Danemark, la laine de roche a été introduite comme substrat de culture, offrant une alternative légère et stérile aux substrats traditionnels comme le sable ou le gravier (**Vitre, 2003**). Ces avancées technologiques ont permis de développer des systèmes de culture hors-sol plus efficaces et adaptés à une production commerciale, notamment dans les serres modernes où la maîtrise des conditions environnementales est essentielle (**Roy, 2022**).

Aujourd'hui, la culture hors-sol est largement utilisée dans l'agriculture moderne, notamment pour la production de légumes sous serre, où elle offre des avantages significatifs en termes de rendement et de qualité des produits (**Tüzel et al., 2019**). Elle est également devenue une solution clé pour les régions confrontées à des pénuries d'eau ou à des sols dégradés, car elle permet une utilisation plus efficace des ressources.

En résumé, la culture hors-sol a évolué d'une pratique ancienne à une technologie moderne, offrant des solutions innovantes pour répondre aux défis agricoles actuels. Son histoire riche et ses applications variées en font une méthode essentielle pour l'agriculture durable et intensive (**Vitre, 2003**).

I.2 Les différents systèmes de culture hors-sol

La culture hors-sol englobe une variété de systèmes qui diffèrent selon la manière dont les plantes reçoivent les nutriments et l'eau nécessaires à leur croissance. Selon l'ouvrage collectif dirigé par **Blanc (1987)**, Ces systèmes peuvent être classés en deux grandes catégories : les systèmes de culture hydroponique (basés sur l'eau) et les systèmes de culture sur substrat. Chacun de ces systèmes présente des caractéristiques spécifiques, adaptées à différents types de cultures et environnements.

I.2.1 Les systèmes de culture hydroponique

Les systèmes hydroponiques reposent sur l'utilisation d'une solution nutritive dans laquelle les racines des plantes sont immergées ou exposées.

Parmi les systèmes les plus courants, on trouve :

I.2.1.1 La culture en eau profonde :

Dans ce système, les racines des plantes sont entièrement ou partiellement immergées dans une solution nutritive. Un système d'aération est souvent utilisé pour fournir de l'oxygène aux racines, évitant ainsi l'asphyxie. Ce système est simple et efficace, mais il nécessite une surveillance constante pour éviter les problèmes liés à la stagnation de l'eau et au manque d'oxygène.



Figure I.2 : Culture en eau profonde. (**Hydroponies.com, 2025**)

I.2.1.2 La technique du film nutritif

Ce système consiste à faire circuler un mince film de solution nutritive dans des canaux où les racines des plantes sont exposées. L'avantage principal de cette technique est qu'elle permet une aération optimale des racines tout en assurant un apport constant en nutriments. Cependant, elle nécessite une gestion précise pour éviter les interruptions dans la circulation de la solution, qui pourraient endommager les plantes.

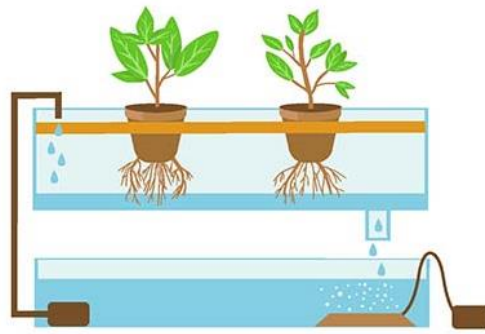


Figure I.3 : Culture hors sol NFT. (GrowWithoutSoil.com, 2025)

I.2.1.3 L'aéroponie

L'aéroponie est une technique où les racines des plantes sont suspendues dans l'air et régulièrement aspergées d'une solution nutritive sous forme de brouillard. Ce système permet une oxygénation maximale des racines et une absorption rapide des nutriments. Il est particulièrement adapté aux cultures à cycle court et aux environnements contrôlés, comme les serres high-techs.

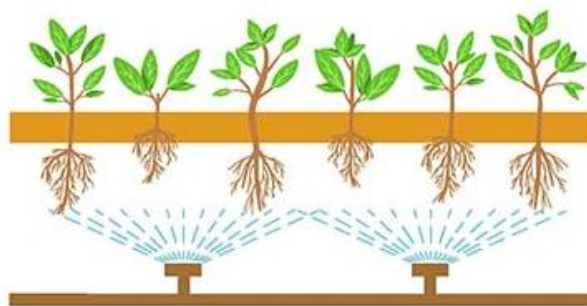


Figure I.4 : Le système aéroponique. (GrowWithoutSoil.com, 2025)

I.2.1.4 La culture flottante

Ce système est souvent utilisé pour la production de légumes à feuilles, comme la laitue ou les épinards. Les plantes sont placées sur des panneaux flottants qui reposent sur un bassin rempli de solution nutritive. Ce système est simple à mettre en place et permet une production rapide et uniforme.



Figure I.5 : La culture flottante. (GrowWithoutSoil.com, 2025)

I.2.2 Les systèmes de culture sur substrat

Les systèmes de culture sur substrat utilisent un support solide pour ancrer les racines des plantes, tout en fournissant les nutriments via une solution nutritive. Les substrats peuvent être d'origine organique ou inorganique, et chaque type a ses avantages et inconvénients.



Figure I.6 : Quelques types de milieux communs utilisés dans les systèmes de culture hors-sol côte à côte (en haut, de gauche à droite : vermiculite, perlite, sable, coco-coir ; en bas, de gauche à droite : pierres ponce, argile expansée, cubes de mousse, cubes de laine de roche).

(IFAS, 2025)

I.2.2.1 La culture en sacs

Dans ce système, les plantes sont cultivées dans des sacs remplis de substrats comme la laine de roche, la fibre de coco ou la perlite. Ces sacs sont percés pour permettre l'écoulement de l'excès de solution nutritive. Ce système est largement utilisé pour les cultures de tomates, de concombres et de poivrons en raison de sa simplicité et de son efficacité.

I.2.2.2 La culture en conteneurs

Les plantes sont cultivées dans des conteneurs individuels remplis de substrat. Ce système permet une gestion précise de chaque plante, ce qui est idéal pour les cultures à haute valeur ajoutée. Les substrats couramment utilisés incluent la perlite, la vermiculite et les fibres de coco.

I.2.2.3 La culture en rigoles

Ce système utilise des rigoles remplies de substrat, comme le sable ou le gravier, pour soutenir les plantes. La solution nutritive est distribuée via un système d'irrigation goutte à goutte. Ce système est souvent utilisé pour les cultures de fraises ou de légumes à cycle court.

I.3 Avantages de la culture hors-sol

I.3.1 Contrôle précis des nutriments

L'un des principaux avantages de la culture hors-sol est la possibilité de contrôler avec précision les apports en nutriments. Les plantes reçoivent exactement ce dont elles ont besoin pour leur croissance, ce qui optimise leur développement et améliore les rendements. Cette précision permet également d'éviter les carences ou les excès nutritifs, fréquents en agriculture traditionnelle (Vitre, 2003).

I.3.2 Réduction des maladies et des parasites

En éliminant le sol comme support de culture, la culture hors-sol réduit considérablement le risque de maladies transmises par le sol, telles que les champignons, les bactéries ou les nématodes. Cela permet de limiter l'utilisation de pesticides, ce qui est bénéfique pour l'environnement et la santé des consommateurs (Tüzel et al., 2019).

I.3.3 Efficacité hydrique

Les systèmes hors-sols, en particulier ceux en circuit fermé, permettent une utilisation optimale de l'eau. La solution nutritive est recyclée, ce qui réduit les pertes par évaporation ou infiltration. Cette efficacité est particulièrement importante dans les régions arides où l'eau est une ressource rare et précieuse (Roy, 2022).

I.3.3 Adaptabilité à différents environnements

La culture hors-sol peut être mise en œuvre dans des environnements où l'agriculture traditionnelle est impossible, comme les zones urbaines, les déserts ou les sols contaminés. Elle permet ainsi de produire des aliments frais localement, même dans des conditions difficiles (Tüzel et al., 2019).

I.3.4 Augmentation des rendements et de la qualité des produits

Grâce au contrôle précis des conditions de croissance (lumière, température, humidité, nutriments), les plantes cultivées hors-sol atteignent souvent des rendements supérieurs à ceux de l'agriculture traditionnelle. De plus, les produits sont généralement de meilleure qualité, avec une teneur plus élevée en nutriments et une apparence plus uniforme (Vitre, 2003).

I.4 Inconvénients de la culture hors-sol

I.4.1 Coûts initiaux élevés

La mise en place d'un système de culture hors-sol nécessite un investissement initial important en équipements (serres, systèmes d'irrigation, substrats, etc.) et en technologie (capteurs, systèmes de contrôle automatisés). Ces coûts peuvent être prohibitifs pour les petits producteurs ou les agriculteurs des pays en développement (Roy, 2022).

I.4.2 Connaissances techniques requises

La gestion efficace des systèmes hors-sol demande une expertise technique pour surveiller et ajuster des paramètres comme le pH, la conductivité électrique (EC) de la solution nutritive, et la température. Une mauvaise gestion peut entraîner des problèmes de croissance, voire la perte totale des cultures (Tüzel et al., 2019).

I.4.3 Risque de propagation rapide des maladies

Dans les systèmes fermés, où la solution nutritive est recyclée, une maladie ou un pathogène peut se propager rapidement à toutes les plantes si elle n'est pas détectée et traitée à temps. Cela nécessite une surveillance constante et des mesures de désinfection rigoureuses (Vitre, 2003).

I.4.4 Dépendance énergétique

Les systèmes hors-sols, en particulier ceux utilisés en serres, dépendent souvent de sources d'énergie pour le chauffage, l'éclairage artificiel et la circulation des solutions nutritives. Cette dépendance peut augmenter les coûts opérationnels et l'empreinte carbone de la production (Tüzel et al., 2019).

I.4.5 Problèmes liés aux substrats

Certains substrats, comme la laine de roche ou la fibre de coco, posent des problèmes environnementaux en fin de vie, car ils ne sont pas toujours biodégradables. Leur élimination ou recyclage peut être coûteux et complexe (Roy, 2022).

I.5 Applications pratiques et perspectives

Malgré ces inconvénients, la culture hors-sol est de plus en plus adoptée dans le monde entier, en particulier pour la production de légumes sous serre (tomates, concombres, poivrons) et de légumes à feuilles (laitue, épinards). Elle est également utilisée pour la culture de plantes aromatiques (basilic, origan) et de fleurs coupées. Dans les régions où les ressources en eau sont limitées ou où les sols sont dégradés, la culture hors-sol offre une solution durable pour assurer la sécurité alimentaire (Tüzel et al., 2019).

En conclusion, la culture hors-sol présente des avantages significatifs en termes de rendement, de qualité des produits et d'efficacité des ressources. Cependant, elle nécessite des investissements importants et une expertise technique pour surmonter ses inconvénients. Avec des innovations continues et une gestion rigoureuse, cette méthode a le potentiel de jouer un rôle clé dans l'agriculture durable de demain (Vitre, 2003).

Chapitre II :

Caractéristiques et importance de l'orge.

CHAPITRE II

CARACTÉRISTIQUES ET IMPORTANCE DE L'ORGE.

II.1 Généralité et historique

L'orge (*Hordeum vulgare* L.) compte parmi les premières céréales domestiquées par l'homme, avec une histoire riche et complexe qui remonte à la préhistoire. Les recherches archéologiques situent son origine dans les régions d'Éthiopie et du Croissant fertile, où des traces de sa culture datant de 8000 av. J.-C. ont été identifiées (Murray et al., 2005). Cette domestication précoce fut rendue possible par des mutations génétiques naturelles, notamment le développement d'un rachis solide qui empêchait la dispersion des grains, facilitant ainsi la récolte (Badr et al., 2000).

Dans l'Antiquité, l'orge joua un rôle central dans les civilisations méditerranéennes et moyen-orientales. Les Babyloniens en firent la base de leur alimentation et maîtrisaient déjà vers 2800 av. J.-C. les techniques de fabrication de bière d'orge, comme en témoigne le plus ancien texte connu contenant une recette de "vin d'orge" (Murray et al., 2005). Les Égyptiens la cultivaient abondamment dans la vallée du Nil, tandis que les Grecs anciens la considéraient comme un aliment essentiel pour les athlètes, leur conférant force et endurance. Les gladiateurs romains étaient d'ailleurs surnommés "hordearii" (mangeurs d'orge), soulignant son importance dans leur régime alimentaire (Murray et al., 2005).

Durant le Moyen Âge européen, l'orge conserva une place importante dans l'alimentation paysanne, souvent mélangée au seigle pour produire un pain rustique. Sa capacité à pousser dans des conditions climatiques difficiles en faisait une culture de subsistance cruciale lors des périodes de disette (Murray et al., 2005). À partir du XVI^e siècle, les explorateurs espagnols l'introduisirent en Amérique du Sud, tandis que les colons anglais et hollandais l'apportèrent en Amérique du Nord, étendant ainsi son aire de culture à l'échelle mondiale.

Au Maghreb, l'orge fut introduite depuis le Croissant fertile via l'Égypte et devint rapidement la céréale dominante.

En Algérie, l'orge a connu une histoire particulière, intimement liée aux transformations socio-économiques du pays. Durant la période précoloniale, elle occupait une place prépondérante dans le système agricole et alimentaire algérien. Les statistiques coloniales

montrent qu'elle représentait encore la principale culture céréalière jusqu'en 1900, avant de connaître un déclin continu (**Rahal-Bouziane H., 2015**). Ce recul s'explique par plusieurs facteurs : la politique agricole coloniale favorisant les cultures d'exportation comme le blé tendre, les changements dans les modes de consommation urbaine, et la marginalisation des pratiques traditionnelles. Pourtant, dans certaines régions comme les hauts plateaux et les zones steppiques, l'orge a conservé son importance grâce à sa remarquable adaptation aux conditions climatiques difficiles. Aujourd'hui, bien que principalement destinée à l'alimentation animale, elle fait l'objet d'un regain d'intérêt dans le cadre des stratégies de sécurité alimentaire et d'adaptation au changement climatique (**Rahal-Bouziane H., 2015**).

Aujourd'hui, bien que reléguée au second plan derrière le blé et le maïs dans de nombreuses régions, l'orge connaît un regain d'intérêt pour ses qualités nutritionnelles et son adaptation aux conditions climatiques difficiles. Son histoire multimillénaire témoigne de sa remarquable capacité d'adaptation et de sa contribution durable à l'alimentation humaine et animale à travers les âges.

II.2 Classification botanique et description générale

II.2.1 Nom scientifique et classification botanique

L'orge cultivée (*Hordeum vulgare* L.) appartient à la famille des **Poaceae** (graminées) et au genre *Hordeum*, qui comprend 32 espèces (**Brink et Belay, 2006**). Elle se divise en deux sous-espèces principales :

-ssp. *vulgare* (orge cultivée) .

-ssp. *spontaneum* (orge sauvage, ancêtre de l'orge domestiquée) (**Brink et Belay, 2006**).

Les variétés cultivées se distinguent par :

-Le nombre de rangs de grains (**2 rangs** et **6 rangs**).



Figure II.1 : Orge 2 rangs et orge 6 rangs. (**The Daily Garden, 2017**)

-La présence ou l'absence d'arêtes (**orges barbues** vs **orges nues**) (**Couturier et Sartory, 1931**).



À gauche orges nues à droite orges barbues.

Figure II.2 : orges nues et orges barbues. (INIA, 2025)

Sa classification complète est la suivante :

- Règne** : Plantae.
- Sous-règne** : Tracheobionta .
- Division** : Magnoliophyta.
- Classe** : Liliopsida.
- Ordre** : Poales.
- Famille** : Poaceae.
- Sous-famille** : Pooideae.
- Tribu** : Triticeae.
- Genre** : Hordeum.
- Espèce** : *Hordeum vulgare* L.

II.2.2 Origine et distribution géographique

L'orge domestiquée a été cultivée pour la première fois en Asie occidentale et en Afrique du Nord il y a environ 10 000 ans. Ces régions sont considérées comme le centre d'origine de l'orge, bien que des traces de sa culture aient également été retrouvées dans d'autres parties du monde, telles que l'Afrique et l'Asie (**Brink et Belay, 2006**).

Le succès de la domestication de l'orge s'explique probablement par :

- Sa plasticité phénotypique
- Sa courte durée du cycle cultural
- Sa tolérance aux stress abiotiques

Ces caractéristiques en ont fait une céréale pionnière dans l'expansion de l'agriculture néolithique.

Aujourd'hui, elle est cultivée dans des zones climatiques variées :

- Afrique du Nord** (Éthiopie, Maroc, Algérie) : cultures en haute altitude (1 500–3 500 m).
- Europe** : principalement pour la brasserie.

-Asie : Chine, Inde (cultures traditionnelles).

II.2.3 Caractéristiques morphologiques (racine, tige, feuilles, fleurs, graines)

L'orge est une plante herbacée annuelle ou vivace, caractérisée par une grande variabilité morphologique selon les variétés et les conditions de culture. Voici une description détaillée de ses principales caractéristiques morphologiques (**Brink et Belay, 2006 ; Jacques-Félix, 1962**) :

-Racines

Racines primaires : 3 à 9 racines initiales.

Racines adventives : se développent après la levée, formant un réseau dense (**Brink et Belay, 2006**).

Cette dualité racinaire confère à l'orge une bonne résilience face aux stress hydriques, particulièrement utile en zones arides.

-Tige (chaume)

La tige de l'orge est érigée, parfois genouillée, et peut atteindre des hauteurs allant de 80 cm à plus de 1 mètre, selon les conditions de croissance. Elle est robuste et porte des feuilles alternées et simples (**Jacques-Félix, 1962**).

-Feuilles

Les feuilles de l'orge sont linéaires et lancéolées, mesurant généralement de 5 à 40 cm de long et de 0,5 à 1,5 cm de large. Chaque tige porte de 5 à 10 feuilles, disposées de manière alternée. La base des feuilles présente une paire d'auricules et une ligule hyaline, ciliée, qui est un trait distinctif de cette espèce (**Brink et Belay, 2006**).

-Fleurs et inflorescence :

Type : épi terminal cylindrique (5–30 cm de long).

Structure : groupes de 3 épillets par nœud (**Couturier & Sartory, 1931**).

Fleurs : autogames (90 %), mais possibilité de pollinisation croisée (10 %) (**Brink et Belay, 2006**).

Le grain mature, ou caryopse, est de forme ellipsoïde, légèrement aplati et généralement poilu à l'extrémité (**Jacques-Félix, 1962**).

-Graines

Forme : ellipsoïde, aplatie.

Poids : 25–50 g/1 000 grains.

Types :

-Orge vêtue (lemme adhérente).

-Orge nue (grain libre) – mutation récessive (**Brink & Belay, 2006**).

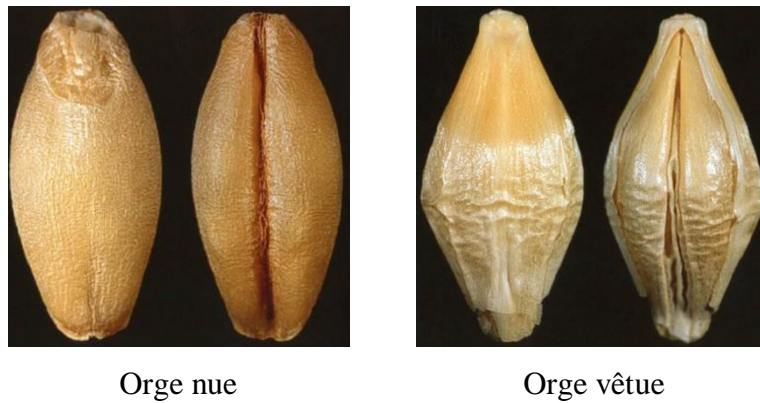


Figure II.3 : Orge nue et Orge vêtue. (Grains Canada, 2019)

II.3 Exigences environnementales pour la culture de l'orge

II.3.1 Type de sol idéal

L'orge présente une remarquable adaptabilité aux différents types de sols, mais exprime son meilleur potentiel dans des conditions spécifiques :

- Texture** : Limoneuse à limono-argileuse.
- Profondeur** : Minimum 40-60 cm.
- Drainage** : Bien drainé (très sensible à l'asphyxie racinaire).
- pH** : 6.0-8.5 (tolère mieux les sols alcalins que les autres céréales).

La sensibilité particulière de l'orge à l'asphyxie racinaire (**Brink et Belay, 2006**) explique ses piètres performances en sols lourds et compactés.

II.3.2 Besoins climatiques (température, lumière, précipitations)

II.3.2.1 Température :

- Germination** : Optimale à 12-15°C
- Croissance végétative** : 15-20°C
- Vernalisation** : Nécessaire pour les variétés d'hiver (3-12°C pendant 4-8 semaines)

Tableau II.1 : Comparaison des types d'orge selon leur tolérance thermique.

| Type | Température minimale | Tolérance gel |
|-------------------|--------------------------|---------------|
| Orge d'hiver | -15°C (au stade tallage) | Excellente |
| Orge de printemps | -5°C | Limitée |

Source : Adapté de **Brink & Belay (2006)**.

II.3.2.2 Besoins en eau :

- Pluviométrie optimale** : 400-600 mm/an
- Périodes critiques** : Tallage, Montaison et épiaison.

L'orge possède une maturation précoce qui lui permet d'échapper aux sécheresses terminales (**Brink et Belay, 2006**), stratégie particulièrement avantageuse dans les zones semi-arides algériennes.

II.3.2.3 Photopériode :

- Espèce de jours longs à réponse quantitative
- Sensibilité variable selon les cultivars : Très sensibles (floraison accélérée par jours longs), Pratiquement insensibles.

II.3.2.4 Facteurs limitants principaux :

-Contraintes majeures :

Stress hydrique : Réduction du nombre de talles fertiles et du poids des grains

Températures élevées (>30°C) pendant le remplissage des grains

Sols acides (pH <6.0) : Induisent des carences en phosphore et en oligo-élément

-Cas particulier des sols salins :

Certains cultivars tolèrent une salinité atteignant 1% (**Brink et Belay, 2006**), ce qui ouvre des perspectives intéressantes pour les zones steppiques algériennes affectées par la salinisation.

II.3.2.5 Adaptation aux différentes zones agro-écologiques en Algérie

Tableau II.2 : Adaptation de l'orge aux zones agricoles algériennes.

| Zone | Avantages | Contraintes | Solutions potentielles |
|---------------|--|----------------------------------|------------------------------------|
| Tellien | Climat favorable | Compétition avec autres céréales | Sélection de cultivars précoces |
| Hauts plateau | Bonne adaptation de l'orge d'hiver | Risque de sécheresse terminale | Optimisation des dates de semis |
| Saharien | Possibilité de culture sous irrigation | Stress thermique | Choix de cultivars thermotolérants |

Source : Données compilées et adaptées de **Brink & Belay (2006)**, **Ministère de l'Agriculture (2023)** et **INRA Algérie (2018–2022)**.

II.4 Cycle agricole et méthodes de culture

II.4.1 Périodes optimales de semis :

Les périodes de semis varient selon le type variétal et les conditions locales (**Brink et Belay, 2006**).

-Orge d'hiver

Période : Octobre à décembre en zones nord (**Couturier et Sartory, 1931**)

Avantage clé : Meilleure utilisation des pluies hivernales (**Brink et Belay, 2006**)

-Orge de printemps :

Période : Février-mars (**Brink et Belay, 2006**)

Adaptation : Zones arides à cycle court (**Jacques-Félix, 1962**).

Dans les hauts plateaux, semis précoce (mi-octobre) recommandé pour capter l'humidité résiduelle (**Ministère de l'Agriculture Algérien, 2020**).

II.4.2 Méthodes de semis :

-Semis manuel

Technique traditionnelle dans petites exploitations (**Brink et Belay, 2006**)

Limite : Irrégularité de levée (**Couturier et Sartory, 1931**)

-Semis mécanisé

Écartement : 15-20 cm (**Brink et Belay, 2006**)

Avantage : Précision de densité (**Jacques-Félix, 1962**)

-Densité de semis :

Standard : 100-150 kg/ha (**Brink et Belay, 2006**)

-Ajustement

Sols fertiles : 80-100 kg/ha (**Couturier et Sartory, 1931**)

Zones arides : Jusqu'à 150 kg/ha (**Jacques-Félix, 1962**)

II.4.3 Irrigation :

-Besoins : 300-400 mm/cycle (**Brink et Belay, 2006**).

-Stades critiques : Tallage et épiaison (**Couturier et Sartory, 1931**).

II.4.4 Fertilisation :

Tableau II.3 : Besoins en Fertilisation de l'Orge.

| Élément | Dose (unités/ha) | Période d'Apport | Conditions Spécifiques |
|---|------------------|---|---|
| Phosphore (P₂O₅) | 46 – 70. | Au labour ou avant semis. | - 46 en zones semi-arides - 70 en zones humides. |
| Potassium (K₂O) | 50. | Au labour ou avant semis. | Améliore l'enracinement et la résistance à la sécheresse. |
| Azote (N) | 46 – 70. | Fractionné : - 1/2 au semis - 1/2 en début tallage. | - 46 si pluviométrie <400 mm - 70 si 400-600 mm. |
| Fumure Organique | 10-20 t/ha. | Avant labour. | Sols pauvres en matière organique. |

Source : Adapté du **guide HTGC**.

II.5 Phases de croissance de l'orge

II.5.1 Germination et stade plantule

La germination de l'orge commence dès que les graines sont exposées à des conditions favorables d'humidité et de température. Selon **Brink et Belay (2006)**, la levée des plantules intervient généralement 5 à 6 jours après le semis. Durant cette phase :

- Les racines primaires (3 à 9 racines) et les coléoptiles émergent.
- Les premières feuilles (ébauches foliaires) apparaissent après 8 jours (**Rechachi et al., 2020**).

La sensibilité aux stress abiotiques (salinité, sécheresse) est élevée à ce stade. Des études montrent que des concentrations salines supérieures à 100 meq/l de NaCl peuvent retarder la germination (**Djerah et Oudjehih, 2015**).

II.5.2 Croissance végétative

Cette phase se caractérise par :

- Le tallage : Formation de pousses secondaires (talles), dont le nombre varie entre 1 et 6 par plante, influencé par la densité de plantation et les conditions environnementales (**Brink et Belay, 2006**).
- Le développement du système racinaire et des feuilles : Les variétés tolérantes au sel (comme *Rihane 3*) ajustent leur potentiel osmotique en absorbant et accumulant Na⁺ dans les feuilles, tout en maintenant une production de biomasse sèche stable (**Rechachi et al., 2020**).

-La photopériode joue un rôle clé : l'orge est une plante de jours longs, mais certains cultivars sont moins sensibles (**Brink et Belay, 2006**).

II.5.3 Floraison et fructification :

-L'initiation florale dépend du cultivar et des conditions climatiques. L'orge fleurit généralement plus tôt que le blé (**Brink et Belay, 2006**).

-Les fleurs sont majoritairement autofécondées, avec un taux de pollinisation croisée pouvant atteindre 10%.

-Sous stress salin, la floraison peut être perturbée par une réduction de l'absorption du K^+ et du Ca^{2+} , essentiels pour la reproduction (**Rechachi et al., 2020**).

II.5.4 Maturation et récolte

La maturation des grains prend **20 à 40 jours** après la floraison. L'orge mûrit rapidement, ce qui en fait une culture adaptée aux saisons courtes (**Brink et Belay, 2006**).

-Critères de récolte :

Taux d'humidité des grains entre 35–40% (**Brink & Belay, 2006**).

Les variétés tolérantes au sel (ex. *Tichedrett*) maintiennent un rendement acceptable même à 150 meq/l de NaCl, grâce à une accumulation contrôlée de Na^+ dans les vacuoles (**Rechachi et al., 2020**).

-**Rendements** : Varient de 0.3 t/ha en conditions marginales à 10 t/ha en agriculture intensive (**Brink et Belay, 2006**).

II.5.5 Cycle de développement :

L'orge passe par plusieurs phases de développement, chacune influencée par les conditions climatiques, notamment la température.

-**Germination** : Les graines d'orge commencent à germer à une température optimale de 20°C, bien qu'elles puissent supporter des températures minimales de 1 à 2°C et maximales de 28 à 30°C.

-**Tallage** : Durant cette phase, l'orge développe des tiges secondaires et peut tolérer des températures basses allant de -10 à -12°C.

-**Floraison** : Des températures élevées pendant cette étape peuvent réduire le nombre de grains formés par épi, affectant ainsi le rendement final.

-**Remplissage du grain** : La température idéale pour cette phase est d'environ 20°C, permettant aux grains d'accumuler leurs réserves nutritives.

-Maturation et récolte : L'orge atteint sa maturité physiologique et devient prête pour la récolte une fois que les grains ont atteint un taux d'humidité approprié.

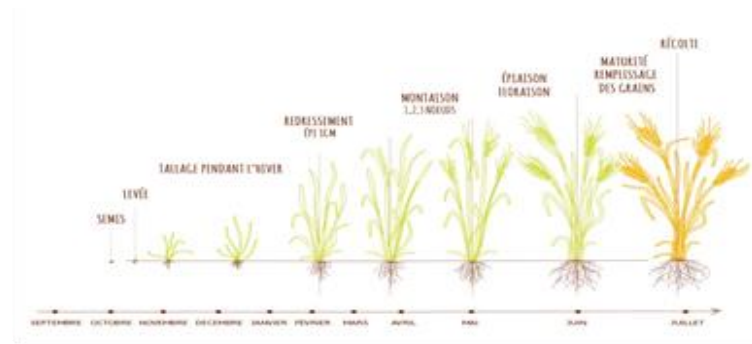


Figure II.4 : Cycle de développement de l'orge. (VIVESCIA, 2022).

II.6 Utilisations de l'orge

II.6.1 L'orge comme fourrage

L'orge occupe une place importante dans l'alimentation animale, notamment pour les ruminants, les volailles et les porcs. Sa valeur énergétique, bien que légèrement inférieure à celle du maïs, peut être optimisée par des traitements technologiques tels que le maltage ou l'addition d'enzymes (Benabdeljelli, 1999).

II.6.1.1 Avantages nutritionnels

Teneur élevée en protéines (10-14%), supérieure à celle du maïs (Schilperoord, 2013).
Source de fibres, favorisant la digestion chez les ruminants.

Possibilité d'incorporation jusqu'à 50% dans les rations avicoles avec des compléments enzymatiques (Benabdeljelli, 1999).

II.6.1.2 Limitations

Présence de bêta-glucanes, réduisant la digestibilité chez les monogastriques (Benabdeljelli, 1999).

Nécessité de traitements (broyage, décorticage) pour améliorer son assimilation, Cette utilisation contribue à réduire la dépendance aux céréales importées, comme le maïs, dans les systèmes d'élevage intensifs (Benabdeljelli, 1999).

II.6.2 L'orge dans l'alimentation humaine :

Historiquement, l'orge était une céréale de base dans plusieurs cultures, notamment en Europe et en Afrique du Nord. Aujourd'hui, elle est principalement consommée sous forme de produits transformés.

Produits traditionnels :

- Pain d'orge : Mélangé à d'autres farines pour améliorer sa texture (**Schilperoord, 2013**).
- Bouillies et soupes : Très répandues dans les régions montagneuses pour leur apport énergétique.
- Orge perlé : Décortiqué et poli, utilisé dans des plats comme le *tajine* ou les salades.

Valeur nutritionnelle :

- Riche en fibres solubles (bêta-glucanes), bénéfiques pour la santé cardiovasculaire (**Schilperoord, 2013**).
- Indice glycémique modéré, adapté aux régimes diabétiques.

Cependant, son utilisation a décliné au profit du blé et du riz, sauf dans certaines régions où elle reste un aliment traditionnel (**Schilperoord, 2013**).

II.6.3 L'orge dans l'industrie

L'orge joue un rôle clé dans plusieurs industries, notamment la brasserie et la production de malt.

-Brasserie : L'orge maltée est essentielle pour la fabrication de la bière, grâce à son amidon fermentescible (**Schilperoord, 2013**).

Les variétés à deux rangs sont préférées pour leur faible teneur en protéines (**Benabdeljelli, 1999**).

-Bioéthanol : Conversion de l'amidon d'orge en biocarburant.

-Aliments diététiques : Utilisation dans les céréales petit-déjeuner et les barres énergétiques.

-Cosmétique : Extraits utilisés pour leurs propriétés hydratantes.

Malgré son potentiel, la transformation industrielle de l'orge reste limitée dans certains pays en raison du manque d'infrastructures adaptées (**Benabdeljelli, 1999**).

Chapitre III :

La production de fourrage vert.

CHAPITRE III

LA PRODUCTION DE FOURRAGE VERT

III.1 Définition et importance du fourrage vert

III.1 Définition du fourrage vert :

Le fourrage vert désigne toute matière végétale fraîche, non séchée, destinée à l'alimentation animale. Il se caractérise par sa haute teneur en humidité (70-90%) et sa richesse en nutriments facilement digestibles (**Abdelguerfi et al., 2008**). Selon les recherches, sa valeur nutritionnelle provient principalement de sa teneur élevée en protéines brutes (15-25%), vitamines (A, E) et minéraux essentiels comme le phosphore et le calcium (**Baumont et al., 2009**).

III.1.1.1 Caractéristiques principaux :

-Sur le plan nutritionnel

Digestibilité élevée (70-80%) comparée aux fourrages secs, Richesse en protéines et énergie immédiatement disponible, Teneur élevée en eau favorisant l'hydratation des animaux.

-Sur le plan agronomique

Cycle de production court (30-60 jours), Adaptabilité à différents systèmes de production, Rendements élevés en biomasse verte.

III.1.1.2 Classification des fourrages verts

On distingue principalement :

-Fourrages cultivés

Graminées : orge, avoine, ray-grass.

Légumineuses : luzerne, trèfle, vesce.

Cultures spécifiques : maïs fourrager, sorgho.

-Fourrages spontanés

Plantes des prairies naturelles.

Végétation des parcours et jachères.

III.1.1.3 Importance dans le contexte algérien

Les fourrages verts jouent un rôle crucial dans le système agricole algérien, particulièrement pour un cheptel estimé à plus de 33.6 Millions de têtes au cours de la période 2010-2017 (**SERIE B, 2019**). Pourtant, leur production reste insuffisante, couvrant à peine 5% des besoins nationaux, ce qui explique la dépendance aux importations pour les protéines animales. Cette situation reflète un déséquilibre structurel dans la politique agricole algérienne, qui privilégie les céréales au détriment des cultures fourragères. Une réorientation vers des systèmes intégrés "céréales-élevage" pourrait pourtant réduire cette dépendance, comme le démontrent les expériences réussies en zones semi-arides via l'introduction de légumineuses (**Abdelguerfi et al., 2008**).

Les surfaces fourragères cultivées (457 000 ha en 1994) sont dominées par des associations peu diversifiées (vesce-avoine, orge), avec des rendements médiocres dus à des itinéraires techniques inadaptés (absence de fertilisation, dates de récolte non respectées). Parallèlement, la steppe, qui couvre 20 millions d'hectares, subit une dégradation accélérée par le surpâturage et la mise en culture anarchique. Ces contraintes révèlent un cercle vicieux : la faible productivité des fourrages cultivés accroît la pression sur les parcours naturels, aggravant la désertification (**Abdelguerfi et al., 2008**).

Le tableau ci-dessous montre l'évolution de la production et de la superficie plantée pour diverses cultures fourragères entre 2005 et 2014 :

Tableau III.1 : Superficies et production des fourrages exploités en vert ou ensilés (**MADRP,2016**).

| Années | S (ha) Maïs, sorgho | P (Qx) | S (ha) Orge, avoine, seigle | P (Qx) | S (ha) Trèfle, luzerne | P (Qx) | S (ha) Divers | P (Qx) | S (ha) Total | P (Qx) |
|--------|---------------------------|---------|--------------------------------------|----------|------------------------------|---------|------------------|---------|-----------------|----------|
| 2005 | 7087 | 938720 | 74315 | 5709720 | 6604 | 1174380 | 1297 | 197550 | 89303 | 8020370 |
| 2006 | 5546 | 823840 | 96860 | 5767896 | 7521 | 1402264 | 1220 | 261000 | 111149 | 8255000 |
| 2007 | 6111 | 1085010 | 74797 | 5875400 | 7870 | 1317765 | 3675 | 394245 | 92453 | 8672420 |
| 2008 | 6015 | 1071375 | 77188 | 5450360 | 6336 | 1213195 | 9267 | 702870 | 92806 | 8455698 |
| 2009 | 7075 | 1236670 | 72215 | 7253973 | 8377 | 1799933 | 32353 | 1846020 | 120020 | 12136604 |
| 2010 | 7687 | 1279104 | 91446 | 10032073 | 10033 | 2906197 | 19207 | 3201825 | 129373 | 16160199 |
| 2011 | 10158 | 2282730 | 104209 | 9306842 | 8754 | 2184570 | 1227 | 419514 | 124348 | 14191656 |
| 2012 | 11217 | 2198060 | 115526 | 10955155 | 12345 | 3245085 | 1221 | 556645 | 140309 | 16928945 |
| 2013 | 10982 | 2335117 | 112575 | 11293784 | 16583 | 3485775 | 15599 | 578414 | 154739 | 17694135 |
| 2014 | 9525 | 2456424 | 99161 | 10702091 | 15511 | 3577330 | 21815 | 950493 | 144032 | 17863338 |

S: Superficie. P : Production.

III.1.2 Rôle dans l'alimentation animale

Le fourrage vert joue un rôle fondamental dans l'alimentation du bétail, offrant des avantages nutritionnels et économiques significatifs. Selon les recherches disponibles dans les

documents fournis, sa consommation régulière améliore notablement les performances zootechniques.

III.1.2.1 Avantages nutritionnels :

-Digestibilité élevée

Les fourrages verts présentent une digestibilité de 65-80%, supérieure à celle des fourrages secs (Baumont et al., 2007).

Leur teneur en eau (70-90%) facilite l'ingestion et la digestion (Baumont et al., 2007).

-Richesse en nutriments essentiels :

Protéines : 12-25% de MAT selon les espèces (Abdelguerfi et al., 2008)

Vitamines : A, E et complexe B en abondance (Issolah, 2008)

Minéraux : Calcium (1,2-2,5%) et Phosphore (0,3-0,6%) bien équilibrés (Issolah, 2008)

-Bénéfices spécifiques :

Pour les ruminants : stimule la flore ruminale (Baumont et al., 2007)

Pour les monogastriques : apport en fibres de qualité (Abdelguerfi et al., 2008).

III.2 L'orge hydroponique fourragère : un cas emblématique.

III.2.1 Valeur nutritive

L'orge hydroponique fourragère représente une innovation majeure en agriculture moderne. Cette technique de culture sans sol permet d'obtenir un fourrage hautement nutritif en seulement 7 à 12 jours, avec des rendements supérieurs aux méthodes conventionnelles (Zeng et al., 2018).

Son adoption croissante s'explique par ses multiples avantages :

- Réduction de l'empreinte hydrique.
- Indépendance vis-à-vis des conditions pédoclimatiques.
- Production continue tout au long de l'année.
- Qualité nutritionnelle constante.

Tableau III.2 : Profil nutritionnel de l'orge hydroponique (pour 100g de matière sèche)

| Composant | Teneur | % Des AJR |
|------------|---------|-----------|
| Protéines | 27 g | 54% |
| Fibres | 7,5 g | 25% |
| Calcium | 479 mg | 60% |
| Potassium | 3384 mg | 170% |
| Vitamine C | 251 mg | 310% |
| SOD | 440 U/g | — |

Source : Adapté de Paulíčková et al. (2007) et Zeng et al. (2018)

III.2.2. Avantages nutritionnels :

-Digestibilité améliorée : Taux de digestibilité des protéines atteignant 79% contre 65% pour l'orge classique (**Benabdeljelli, 1999**)

-Riche en antioxydants : Présence de lutonarine (342mg/100g) et saponarine (726mg/100g) (**Zeng et al., 2018**)

-Équilibre minéral : Rapport Ca/P optimal (1,8 :1) pour la santé osseuse des animaux.

Tableau III.3 : Comparaison des valeurs nutritives entre orge hydroponique et conventionnelle.

| Paramètre | Unité | Hydroponique | Conventionnelle | Différence |
|------------|---------|--------------|-----------------|------------|
| Protéines | % MS | 24-28 | 10-14 | +100% |
| Fibres | % MS | 5-8 | 9-12 | -30% |
| β-glucanes | % MS | 2-3 | 4-6 | -50% |
| Vitamine C | mg/100g | 200-250 | 15-20 | +1200% |
| SOD | U/g | 400-500 | 50-100 | +400% |

Source : Adapté de **Zeng et al. (2018)** et **Paulíčková et al. (2007)**

III.2.3 Performances zootechniques

Tableau III.4 : Effets de l'orge hydroponique sur les ruminants

| Paramètre | Amélioration | Espèce concernée |
|------------------------|--------------|------------------|
| GMQ | +15-20% | Bovins laitiers |
| Taux de conception | +12% | Ovins |
| Production laitière | +1,5 kg/j | Vaches laitières |
| Indice de consommation | -8% | Volailles |

Source : Données adaptées de **Benabdeljelli (1999)**, **Zeng et al. (2018)** et **Paulíčková et al. (2007)**.

III.3. Les méthodes traditionnelles de production

III.3.1 Techniques de base

Les méthodes traditionnelles de production de fourrage vert en Algérie s'appuient principalement sur :

-Culture en plein champ

Préparation du sol : labour traditionnel à l'araire ou tracteur (**Abdelguerfi et al., 2008**)

Semis : manuel ou mécanique, avec des densités variables selon l'espèce (100-150 kg/ha pour l'orge fourrager).

Irrigation : recours aux systèmes gravitaires dans les zones favorables (**Issolah, 2008**).

-Pratiques culturales

Rotation avec les céréales (blé/orge) pour maintenir la fertilité du sol.

Utilisation limitée d'engrais organiques (fumier).

Sarclage manuel contre les mauvaises herbes (**Baumont et al., 2007**).

III.3.2 Espèces traditionnellement cultivées

III.3.2.1 Graminées :

-Orge fourrager (*Hordeum vulgare*) : culture dominante en zones semi-arides

-Avoine (*Avena sativa*) : utilisée en mélange avec les légumineuses

III.3.2.2 Légumineuses :

-Vesce (*Vicia sativa*) : souvent associée à l'avoine

-Luzerne (*Medicago sativa*) : dans les périmètres irrigués (**Abdelguerfi et Laouar, 2008**)

III.3.3 Calendrier cultural :

III.3.3.1 Période de semis :

-Automne (octobre-novembre) pour les cultures d'hiver.

-Printemps (mars) pour les cultures de saison courte.

III.3.3.1 Récolte :

-Stade optimal : début épiaison pour les graminées.

-3-4 coupes possibles pour la luzerne (**Issolah, 2008**).

III.4 Les défis liés à la production de fourrage

III.4.1 Contraintes climatiques et environnementales :

III.4.1.1 Stress hydrique :

-Pénurie d'eau chronique dans les régions semi-arides (**Abdelguerfi et al., 2008**).

-Réduction de 30-40% des rendements en années sèches (**Issolah, 2008**).

III.4.1.2 Dégradation des sols :

-Érosion éolienne et hydrique.

-Baisse de la fertilité (taux de MO < 1%) (**Baumont et al., 2007**).

III.4.1.3 Variabilité climatique :

-Précipitations irrégulières.

-Températures extrêmes (gelées tardives, vagues de chaleur).

III.4.2 Contraintes techniques

III.4.2.1 Mauvaise gestion culturale :

-Dates de semis non optimales

-Utilisation de matériel végétal inadapté (**Abdelguerfi et Laouar, 2008**)

III.4.2.2 Problèmes sanitaires :

-Maladies cryptogamiques (oïdium, rouille)

-Ravageurs (pucerons, sauteriaux) (**Baumont et al., 2007**)

III.4.2.3 Manque d'équipement :

- Matériel de récolte obsolète
- Systèmes d'irrigation inefficaces (pertes > 50%)

III.4.3 Contraintes économiques :**III.4.3.1 Coûts de production élevés :**

- Prix des intrants (semences, engrais).
- Main-d'œuvre importante (**Issolah, 2008**).

III.4.3.2 Rentabilité limitée :

- Concurrence avec les cultures céréalières.
- Faible valorisation des produits animaux.

III.4.3.3 Dépendance aux importations :

- Achat de semences fourragères.
- Recours aux aliments concentrés (**Abdelguerfi et al., 2008**).

III.4.4 Contraintes structurelles :**III.4.4.1 Accès à la terre :**

- Parcelles morcelées.
- Conflits d'usage (agriculture vs. Élevage).

III.4.4.2 Manque de formation :

- Méconnaissance des itinéraires techniques.
- Résistance au changement (**Baumont et al., 2007**).

III.4.4.3 Problèmes de commercialisation :

- Circuits de distribution peu organisés.
- Prix instables.

Chapitre IV :

**Travaux antérieurs sur la
culture hors-sol de l'orge.**

Chapitre IV

Synthèse de Littérature

IV.1 Introduction

Ce chapitre présente une analyse approfondie des recherches antérieures sur la culture hydroponique de l'orge comme fourrage vert, en mettant l'accent sur les avancées récentes et les défis persistants. À travers l'examen d'études scientifiques et de rapports techniques, nous identifions les lacunes dans les connaissances et soulignons la contribution unique de cette étude à l'avancement du domaine.

IV.2 Analyse Critique des Études Antérieures

IV.2.1 Efficacité des Ressources

Économie d'eau :

L'étude de **Mirallès-Bruneau (2015)** a montré que les systèmes hydroponiques utilisent 200 fois moins d'eau que l'agriculture traditionnelle, grâce au recyclage de la solution nutritive.

Au Niger, le projet **INRAN/OXFAM (2020)** a produit du fourrage vert en 7 jours avec seulement 5 litres d'eau par kg de graines.

Espace requis :

Selon **Boulechfar (2018)**, 10 kg de fourrage vert peuvent être produits sur 1 m², ce qui rend le système idéal pour les zones urbaines.

IV.2.2 Qualité Nutritionnelle

Protéines et fibres :

Les analyses de **d'Ammari & Khelil (2019)** révèlent que le fourrage hydroponique contient 27 % de protéines brutes contre 12 % pour le foin traditionnel.

La teneur réduite en fibres (5-8 %) améliore la digestibilité chez les animaux.

Vitamines et minéraux :

Les jeunes pousses hydroponiques sont riches en vitamine C (251 mg/100g) et en calcium (479 mg) (**Zeng et al., 2018**).

IV.2.3 Défis Pratiques

Coût initial :

Roy (2022) note que l'installation d'un système hydroponique simple coûte 50-100 \$/m², mais cet investissement est amorti en 6-12 mois grâce aux économies de fourrage.

Contrôle environnemental :

Tüzel et al. (2019) alertent sur la réduction de la germination à des températures >35°C, nécessitant un refroidissement dans les climats chauds.

IV.3 Lacunes dans la Recherche

Manque d'études en zones arides :

La plupart des recherches proviennent de climats tempérés (Europe, Amérique du Nord), avec peu de données sur les performances en milieux désertiques.

Analyse économique insuffisante :

Absence de modèles précis pour évaluer la rentabilité pour les petites exploitations dans les pays en développement.

Densité optimale des semis :

Les études antérieures n'ont pas déterminé la densité idéale pour les systèmes manuels non mécanisés.

IV.4 Contributions de Cette Étude

Expérimentation multi-conditions :

Test de l'effet des températures élevées (30-34°C) sur la croissance de l'orge, une situation peu documentée.

Identification de la densité optimale pour maximiser le rendement sans gaspillage, Estimation du taux d'irrigation optimal et de l'éclairage nécessaire pour une plus grande productivité en moins de temps afin de minimiser la dépendance énergétique.

IV.5 Conclusion

Alors que la littérature scientifique confirme les avantages de l'hydroponie pour l'orge, cette étude se distingue en abordant trois lacunes majeures : adaptation aux climats chauds, analyse économique rigoureuse, et optimisation de la densité des semis. Les résultats offrent un cadre pratique pour étendre cette technologie aux régions les plus nécessiteuses.

Partie pratique :

**Chapitre V : Matériels et
méthodes.**

CHAPITRE V

MATÉRIELS ET MÉTHODES.

V.1. Dispositif expérimental

Ce chapitre présente en détail le cadre expérimental, les matériaux utilisés, les étapes de préparation des graines, les caractéristiques de la variété d'orge testée, la description des expériences menées ainsi que les paramètres mesurés et les méthodes de collecte et d'analyse des données. L'objectif est de fournir une transparence totale sur la méthodologie suivie, permettant ainsi la reproductibilité des essais et la validation des résultats obtenus.

À titre d'aperçu initial, l'organigramme ci-dessous montre l'ordre des expériences réalisées et le déroulement des opérations.

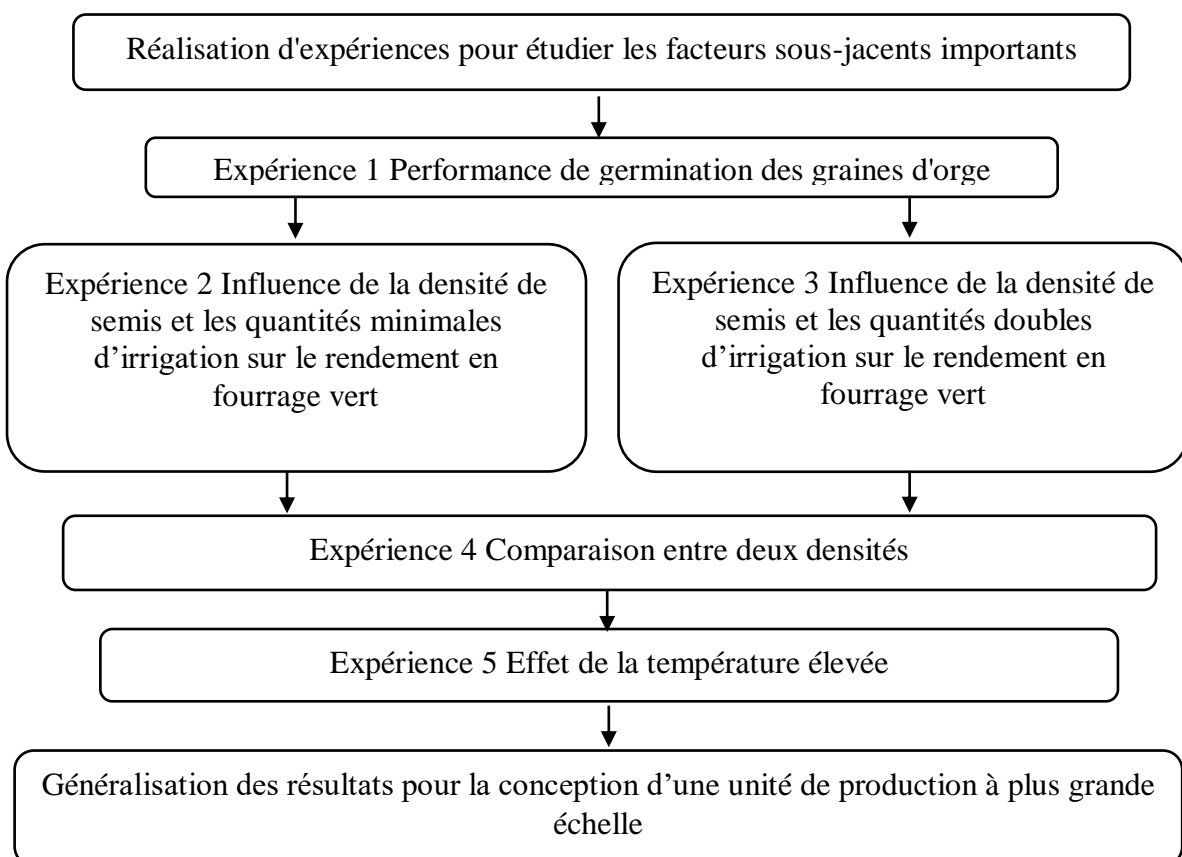


Figure V.1 : Structure de la méthodologie de travail et expériences

V.1.1 Système de culture hors-sol

Les expériences ont été réalisées en conditions de culture hors-sol, sans substrat ni engrais chimique, dans un cadre expérimental simple et accessible. La technique employée repose exclusivement sur l'humidification quotidienne des graines d'orge à l'aide d'un pulvérisateur, sans apport d'éléments nutritifs externes, ce qui s'inscrit dans une approche économique et écologique de production de fourrage vert.

Les graines ont été réparties en fine couche sur la surface de boîtes en plastique de différentes dimensions, selon la nature de chaque expérience. Ce type de culture hydroponique rudimentaire permet d'évaluer le potentiel germinatif et la croissance du fourrage dans des conditions proches de celles que pourraient adopter des éleveurs disposant de moyens limités



Figure V.2 : Les boîtes utilisés pour les expériences. (Photographie personnelle)

V.1.2 Conditions environnementales

Deux environnements distincts ont été utilisés durant la période expérimentale, afin d'évaluer l'impact de la température et de l'éclairage sur le développement du fourrage

- **Température :**

-Dans la pièce : les trois premières expériences ont été conduites dans une chambre dont la température ambiante était relativement stable, oscillant entre 20 °C et 23 °C. Cet environnement permet une observation précise de la croissance dans des conditions tempérées.

-Dans la serre : la quatrième expérience a été réalisée sous serre, où la température était naturellement plus élevée, variant de 30 °C à 34 °C. Ce contexte a permis d'évaluer l'effet de la chaleur sur la vitesse de germination et la vigueur des jeunes pousses.

- **Éclairage :**

L'éclairage est un facteur déterminant dans la croissance des végétaux, notamment en culture hors-sol. Voici les sources lumineuses utilisées

-Dans la pièce : un éclairage artificiel a été assuré par une lampe LED blanche froide de 12 W, complétée par une lumière naturelle modérée entrant par les fenêtres. Ce mélange d'éclairages visait à simuler une photopériode régulière, tout en assurant l'activation du processus de photosynthèse.

-Dans la serre : aucune lumière artificielle n'a été utilisée. L'éclairage provenait exclusivement de la lumière naturelle, bien que celle-ci fût atténuée par la couverture de la serre et dépendante des conditions météorologiques.



Figure V.3 : La serre utilisé. (Photographie personnelle)

V.1.3. Matériel et équipements

Le matériel utilisé a été volontairement limité, afin de reproduire des conditions simples et facilement transposables à une échelle agricole artisanale. Il comprend :

-Récipients en plastique : utilisés pour le lavage et le trempage des graines.



Récipients

Passoire

Figure V.4 : Récipients en plastique. (Photographie personnelle)

-Boîtes de germination : en plastique rigide, de dimensions 10 × 6 cm pour les premiers tests, et 10 × 15 cm pour les essais principaux.

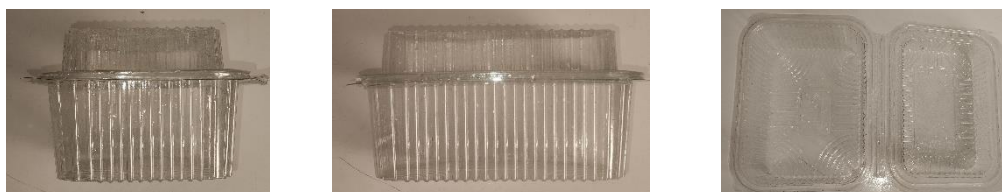


Figure V.5 : Boîtes de germination (10x15x6 cm). (Photographie personnelle)



Figure V.6 : Boîtes de germination (10x5x2 cm). (Photographie personnelle)

-**Pulvérisateur manuel :** pour assurer une humidification fine et régulière.



Figure V.7 : Pulvérisateur manuel. (Photographie personnelle)

-**Balance électronique de précision :** pour mesurer les quantités de graines utilisées et le poids frais des plantules récoltées.



Figure V.8 : Balance électronique (Photographie personnelle)

-**Règle graduée :** pour mesurer la hauteur des tiges et la longueur des racines.

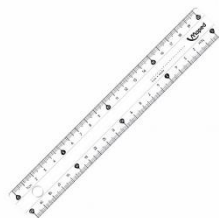


Figure V.9 : Outils de mesure de la hauteur. (Photographie personnelle)

-**Fiches de suivi :** pour consigner les données et observations tout au long des expériences.

-**Une lampe** : Une lampe LED blanc froid de 12W a été utilisée pour fournir un éclairage d'accompagnement à la lumière du jour.



Figure V.10 : Lampe LED blanc froid de 12W. (Photographie personnelle)

V.2 Préparation des grains

Une préparation rigoureuse des graines a été effectuée afin d'assurer une germination homogène, d'éviter les contaminations fongiques, et de garantir la qualité sanitaire du fourrage obtenu.

Les étapes de préparation étaient les suivantes :

- Pesée** : les quantités précises de graines à utiliser pour chaque répétition ont été pesées à l'aide d'une balance électronique.
- Lavage** : les graines ont été lavées abondamment à l'eau claire dans de grands récipients pour éliminer poussières, impuretés et graines endommagées.
- Désinfection** : un trempage rapide dans une solution d'eau de Javel diluée a été réalisé pour limiter le développement de moisissures ou d'agents pathogènes durant la germination.



Figure V.11 : Graines en phase de lavage et de désinfection. (Photographie personnelle)

-**Trempage** : les graines ont ensuite été immergées dans de l'eau propre pendant 12 heures, pour favoriser leur réhydratation et activer les processus enzymatiques de germination.

-**Égouttage** : après le trempage, les graines ont été soigneusement égouttées pour éviter l'excès d'humidité qui pourrait favoriser les fermentations.



Figure V.12 : Le processus d'égouttage des graines (Photographie personnelle)

-Distribution dans les boîtes : les graines ont été réparties en une couche uniforme dans les boîtes de germination.



Figure V.13 : Distribution des graines dans les boîtes (Photographie personnelle)

-Première humidification et obscurité : après avoir humidifié les graines à l'aide du pulvérisateur, elles ont été maintenues dans l'obscurité complète pendant 48 à 72 heures, afin de stimuler le développement racinaire avant l'exposition à la lumière.

V.3 Variété d'orge utilisée

La variété testée dans cette étude est l'orge locale **Tichedrit**, reconnue pour :

- Sa bonne capacité de germination.
- Sa tolérance aux variations climatiques.
- Sa productivité en matière de fourrage vert.
- Sa disponibilité sur le marché local.

Cette variété a été choisie comme modèle expérimental en raison de sa représentativité pour les systèmes d'élevage algériens.



Figure V.14 : l'orge locale Tichedrit.(Photographie personnelle)

V.4 Expériences réalisées

V.4.1 Expérience 1 : Taux de germination

Objectif : évaluer la capacité germinative de la variété Tichedrit dans des conditions proches à idéale.

Méthode : 100 graines ont été disposées sur du papier absorbant humidifié dans trois boîtes (10 × 6 cm). L'humidification a été réalisée manuellement une fois par jour. Le pourcentage de germination a été suivi et calculé sur plusieurs jours.



Figure V.15 : Un test de taux de germination en cours de préparation. (Photographie personnelle)

V.4.2 Influence de la densité de semis et les quantités minimales d'irrigation sur le rendement en fourrage vert

V.4.2.1 Expérience 2 : Influence de la densité de semis et les quantités minimales d'irrigation sur le rendement en fourrage vert

Objectif : analyser l'effet de la quantité de graines et quantités minimales d'irrigation sur la croissance.

Méthode : 4 quantités différentes (30 g, 40 g, 50 g et 60 g) ont été semées dans des boîtes de 10 × 15 cm. Les plantules ont été observées et mesurées selon les paramètres décrits plus loin.

Le régime d'irrigation : Deux régimes d'irrigation distincts ont été adoptés en se basant sur des considérations physiologiques liées à la masse des graines et aux besoins en eau au cours des différentes phases de germination. Durant les trois premiers jours, correspondant à la phase d'imbibition et à l'émergence de la radicule, les besoins hydriques sont modérés. Pour les densités de semis de 30 g et 40 g, une irrigation de 10 ml deux fois par jour a été appliquée, tandis que les densités plus élevées de 50 g et 60 g ont reçu 15 ml deux fois par jour. Ces volumes permettent une hydratation suffisante sans provoquer de stagnation d'eau, ce qui pourrait nuire à l'oxygénation des graines.

À partir du quatrième jour, la croissance active des plantules exige une disponibilité accrue en eau pour soutenir l'allongement cellulaire et l'accumulation de biomasse. Ainsi, les volumes d'irrigation ont été augmentés à 15 ml × 2/jour pour les densités de 30 g et 40 g, et à 20

ml \times 2/jour pour les densités de 50 g et 60 g. Cette modulation vise à ajuster l'apport hydrique en fonction de la charge en graines tout en maintenant une humidité homogène au sein des boîtes de culture fermées, ce qui optimise les conditions de développement sans induire de stress hydrique ni d'anoxie.



Figure V.16 : Expérience 2 : Influence de la densité de semis et les quantités minimales d'irrigation (Photographie personnelle)

V.4.2.2 Expérience 3 : Influence de la densité de semis et les quantités doubles d'irrigation sur le rendement en fourrage vert

Objectif : affiner l'étude de la densité de semis en comparant deux doses précises.

Méthode : 10 boîtes contenant 50 g de graines ont été comparées à 10 boîtes contenant 40 g. Les mesures de hauteur, poids et longueur des racines ont été enregistrées.

Le régime d'irrigation : Les quantités d'irrigation précédentes ont été utilisées, mais en quantités doubles.

V.4.3 Analyse comparative des essais en boîtes multiples (densités 40 g et 50 g)

Objectif : affiner l'étude de la densité de semis en comparant deux doses précises.

Méthode : 10 boîtes contenant 50 g de graines ont été comparées à 10 boîtes contenant 40 g. Les mesures de hauteur, poids et longueur des racines ont été enregistrées.

Le régime d'irrigation : Dans cette expérience, les mêmes quantités d'irrigation utilisées dans l'expérience d'irrigation à densité 50 et 40 ont été utilisées avec les quantités minimales d'eau.



Figure V.17 : Boîtes avec 40g d'orge. (Photographie personnelle)

V.4.4 Expérience 4 : Effet de la température élevée (en serre)

Objectif : déterminer l'impact de la chaleur sur la croissance du fourrage.

Méthode : 10 boîtes contenant chacune 40 g de graines ont été placées dans une serre à température élevée (30–34 °C). Les résultats ont été comparés à ceux des mêmes quantités cultivées en conditions ambiantes.

Le régime d'irrigation : Dans cette expérience, les mêmes quantités d'irrigation utilisées dans l'expérience d'irrigation à densité 50 et 40 ont été utilisées avec les quantités minimales d'eau.

V.5 Paramètres mesurés

Pour évaluer l'évolution des plantules, les paramètres suivants ont été mesurés :

- Hauteur des tiges (cm)** : mesurée à l'aide d'une règle.
- Longueur des racines (cm)** : depuis la base jusqu'à l'extrémité.
- Poids frais (g)** : poids total des plantules récoltées par boîte.

Les mesures ont été réalisées régulièrement (tous les jours), pendant une durée allant de 15 à 17 jours selon les conditions expérimentales.

V.6 Collecte et analyse des données

V.6.1 Méthodologie de collecte

La collecte des données s'est effectuée de manière systématique et structurée tout au long des différentes expériences. Pour chaque boîte de culture, les paramètres suivants ont été relevés :

- La hauteur moyenne des pousses (en mm)
- La longueur moyenne des racines (en mm)
- Le poids frais total des plantules (en grammes)

Les mesures ont été effectuées à intervalles réguliers (quotidiennement). Pour garantir la fiabilité des résultats, chaque mesure a été réalisée sur un échantillon représentatif de plantules par boîte (en moyenne 10 plantules sélectionnées au hasard).

Toutes les données ont été consignées manuellement sur des fiches de suivi avant d'être saisies dans un tableau Excel, permettant ainsi une meilleure organisation, un suivi chronologique rigoureux et une préparation facilitée pour l'analyse

V.6.1 Traitement et analyse des données

L'analyse des résultats repose sur une approche statistique et descriptive, permettant une interprétation rigoureuse des données recueillies. Le traitement a été effectué à l'aide de Microsoft Excel et du langage Python, en utilisant des bibliothèques spécialisées telles que NumPy, SciPy, Pandas et StatsModels pour les calculs et tests statistiques.

V.6.1.1 Méthodes de traitement des données

Afin de garantir une analyse approfondie, plusieurs méthodes ont été appliquées :

- **Calcul des paramètres descriptifs** : Les moyennes, écarts types et valeurs extrêmes ont été déterminés pour chaque paramètre mesuré.
- **Représentation graphique** : Des diagrammes en barres et courbes d'évolution ont été utilisés pour illustrer visuellement les tendances et variations des données.
- **Comparaison des groupes expérimentaux** : L'analyse a permis de mettre en évidence les différences entre les densités de semis et les conditions expérimentales afin de mieux comprendre leur influence sur la croissance.

V.6.1.2 Approche statistique et tests appliqués

Afin de valider scientifiquement les observations, plusieurs tests statistiques ont été réalisés :

- **Analyse de la variance (ANOVA)** : Utilisée pour déterminer si des différences significatives existent entre les groupes de densités.
- **Test de Tukey** : Appliqué après l'ANOVA pour effectuer des comparaisons multiples et identifier précisément les densités présentant des différences marquées.
- **Test T pour échantillons indépendants** : Utilisé pour comparer deux groupes spécifiques afin d'évaluer les variations entre les conditions expérimentales.

V.6.1.2.3 Outils et logiciels utilisés

Le traitement des données et l'analyse statistique ont été effectués en combinant Microsoft Excel pour les calculs descriptifs et Python pour les analyses avancées. Les principales bibliothèques utilisées incluent :

- **NumPy et Pandas** : Gestion et manipulation des données.
- **SciPy** : Exécution des tests statistiques tels que l'**ANOVA** et le test **T**.
- **StatsModels** : Application des tests post-hoc comme **Tukey** afin de comparer les densités entre elles.
- **Matplotlib** : Génération de courbes et représentations graphiques des tendances observées.

Il est à noter que l'étude ne comporte pas d'analyses chimiques ou nutritionnelles en laboratoire (teneurs en protéines, fibres, minéraux), en raison de contraintes matérielles et logistiques. Toutefois, de nombreuses études antérieures ont déjà établi avec fiabilité la composition nutritionnelle typique de l'orge fourragère cultivée en hydroponie, notamment **Zeng et al. (2018)**, **Paulíčková et al. (2007)**, et **Ammari & Khelil (2019)**. Les résultats obtenus dans le présent travail (poids frais, longueur des tiges, etc.) sont cohérents avec ceux rapportés dans la littérature, ce qui permet de supposer que la qualité nutritionnelle est comparable. Une analyse directe pourrait enrichir une étude future à plus grande échelle.

CHAPITR VI :

RÉSULTATS ET

DISCUSSION

CHAPITRE VI

RÉSULTATS ET DISCUSSION

VI.1 Taux de germination des graines d'orge

VI.1.1 La présentation des données

Trois séries de tests de germination ont été réalisées sur une période de 36 heures à température ambiante contrôlée (20–23 °C), en condition d'obscurité et avec une humidification uniforme des graines. Les données recueillies dans les tableaux 1, 2 et 3 révèlent une évolution rapide et efficace du taux de germination.

Tableau VI.1 : Nombre de graines germées dans la boîte 1

| Temps (heures) | Graines germées durant l'intervalle | Total cumulé de graines germées | Pourcentage de germination (%) |
|----------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 3 | 3 | 3 |
| 12 | 11 | 14 | 14 |
| 18 | 26 | 40 | 40 |
| 24 | 32 | 72 | 72 |
| 30 | 14 | 86 | 86 |
| 36 | 7 | 93 | 93 |

Tableau VI.2 : Nombre de graines germées dans la boîte 2

| Temps (heures) | Graines germées durant l'intervalle | Total cumulé de graines germées | Pourcentage de germination (%) |
|----------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 18 | 18 | 18 |
| 18 | 38 | 56 | 56 |
| 24 | 28 | 84 | 84 |
| 30 | 7 | 91 | 91 |
| 36 | 4 | 95 | 95 |

Tableau VI.3 : Nombre de graines germées dans la boîte 3

| Temps (heures) | Graines germées durant l'intervalle | Total cumulé de graines germées | Pourcentage de germination (%) |
|----------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 5 | 5 | 5 |
| 12 | 17 | 22 | 22 |
| 18 | 36 | 58 | 58 |
| 24 | 26 | 84 | 84 |
| 30 | 12 | 96 | 96 |
| 36 | 0 | 96 | 96 |



Les graines de boîte 1 Les graines de boîte 2 Les graines de boîte 3 Les graines de boîte 1 après 6 j

Figure VI.1 : L'état des graines dans chaque boîte après 36 heures de germination, et l'état atteint par la boîte A après 7 jours de surveillance.

L'analyse quantitative des trois tableaux montre les caractéristiques suivantes:

Tableau VI.4

| Série de test | Heure d'apparition des premières racelles | Temps pour 50 % de germination | Temps pour 90–95 % | Taux final de germination (%) |
|---------------|---|--------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Tableau 1 | 6 heures | 24 heures | 30–36 heures | 93 % |
| Tableau 2 | 12 heures | 18 heures | 30–36 heures | 95 % |
| Tableau 3 | 6 heures | 18 heures | 30–36 heures | 96 % |

- Écart-type estimé (approx.) : $\pm 0.57\%$
- Moyenne du taux final : 94.67 %
- Temps moyen pour atteindre 50 % de germination : 18 heures
- Temps pour saturation (plateau) du taux de germination : entre 30 et 36 heures

Ainsi, indépendamment de la série, la cinétique de germination est très similaire (voir le), ce qui atteste de la bonne viabilité des graines utilisées, ainsi que de la standardisation des conditions expérimentales.

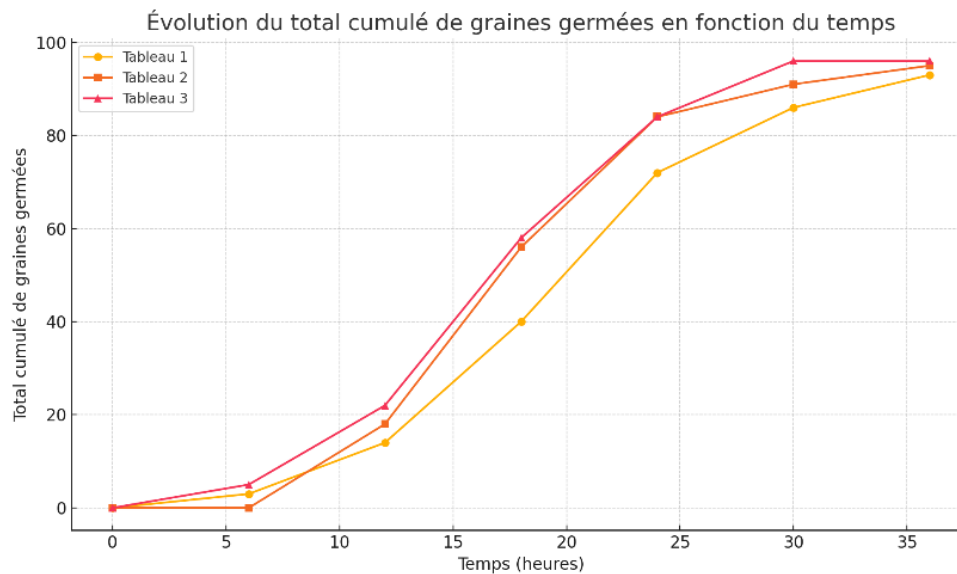


Figure VI.2 : courbes graphiques de l'évolution du nombre de graines germées en fonction du temps.

VI.1.2 Discussion

Le processus de germination de l'orge est influencé par plusieurs facteurs clés, dont la température, la disponibilité en eau, l'oxygénation, ainsi que l'état physiologique des graines.

Les résultats obtenus montrent un taux de germination élevé et homogène entre les séries, ce qui indique que :

- Les graines étaient bien conservées, probablement à faible humidité et température modérée.
- Les conditions expérimentales (humidité continue, température stable à 20–23 °C, aération) étaient optimales pour stimuler l'activité enzymatique initiale, notamment celle de l' α -amylase, cruciale pour mobiliser les réserves d'amidon.
- L'apparition des radicules dès la 6e heure montre une réponse précoce des graines à la réhydratation, signe d'une phase d'imbibition rapide, suivie de la phase de croissance embryonnaire.



Figure VI.3 : Graine d'orge germée après 6 heures de trempage. (Photographie personnelle)

- En comparant avec des données bibliographiques, le taux de germination $>95\%$ en moins de 36 heures s'aligne avec les normes observées pour les cultivars d'orge de bonne qualité (Fisher, 2007). Cette efficacité est essentielle dans le cadre de la production d'orge hydroponique à but fourrager ou nutritionnel, où la rapidité de la phase de germination influence directement la durée du cycle de production.

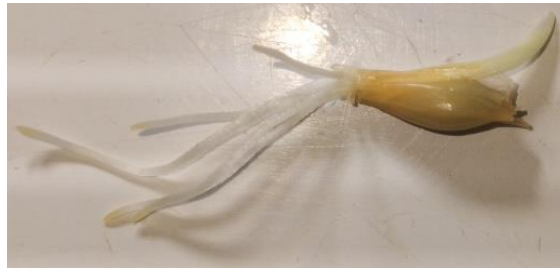


Figure VI.4 : Graine d'orge germée après 18 heures de trempage. (Photographie personnelle)

Le taux de germination élevé et stable des graines confirme leur qualité biologique et permet une croissance continue dans des conditions fiables et reproductibles. Ces résultats justifient le choix d'une période de germination standard de 36 heures avant de passer à l'étape suivante de culture de l'orge dans le milieu de production.

VI.2 Effet de la densité de plantation et de la quantité d'irrigation sur le poids de croissance et la longueur de l'orge hydroponique

Les expériences menées avec quatre densités initiales différentes d'orge (30 g/150cm², 40 g/150cm², 50 g/150cm², et 60 g/150cm²) en trois répétitions, cultivées dans des boîtes de 150 cm², ont permis d'étudier l'effet de la densité et de deux régimes d'irrigation (quantités minimales pour humidifier les graines contre des quantités doublées) sur l'évolution du poids frais ainsi que sur la croissance longitudinale des racines et des tiges. Les résultats obtenus ont été résumés dans des tableaux.

VI.2.1 Expérimentez la germination de différentes densités de graines d'orge avec des quantités d'irrigation minimales suffisantes pour humidifier les graines

VI.2.1.1 La présentation des données

Tableau VI.5 : Évolution quotidienne du poids frais de l'orge germée et irriguée avec des quantités minimales d'eau selon les densités de semis

| Jour | 30g/150 cm ² | | | 40g/150 cm ² | | | 50g/150 cm ² | | | 60g/150 cm ² | | |
|------|-------------------------|-----|-----|-------------------------|-----|-----|-------------------------|-----|-----|-------------------------|-----|-----|
| | R1 | R2 | R3 | R1 | R2 | R3 | R1 | R2 | R3 | R1 | R2 | R3 |
| 1 | 46 | 46 | 45 | 55 | 55 | 57 | 64 | 65 | 62 | 72 | 73 | 70 |
| 2 | 53 | 54 | 52 | 65 | 67 | 66 | 69 | 72 | 68 | 78 | 79 | 75 |
| 3 | 65 | 67 | 64 | 74 | 79 | 77 | 76 | 80 | 74 | 83 | 82 | 81 |
| 4 | 86 | 85 | 82 | 95 | 98 | 96 | 85 | 88 | 82 | 90 | 92 | 90 |
| 5 | 103 | 104 | 102 | 111 | 116 | 115 | 94 | 96 | 93 | 103 | 104 | 102 |
| 6 | 125 | 122 | 123 | 132 | 137 | 138 | 106 | 107 | 105 | 115 | 117 | 115 |
| 7 | 146 | 145 | 143 | 157 | 161 | 160 | 123 | 122 | 121 | 130 | 131 | 130 |
| 8 | 163 | 162 | 161 | 181 | 185 | 183 | 139 | 137 | 138 | 148 | 147 | 147 |
| 9 | 177 | 174 | 172 | 197 | 204 | 201 | 158 | 154 | 157 | 168 | 167 | 166 |
| 10 | 185 | 183 | 181 | 217 | 222 | 221 | 179 | 174 | 177 | 187 | 188 | 186 |
| 11 | 185 | 184 | 183 | 221 | 224 | 229 | 197 | 192 | 196 | 207 | 207 | 206 |
| 12 | 184 | 185 | 182 | 229 | 232 | 233 | 215 | 211 | 214 | 229 | 228 | 226 |
| 13 | 183 | 185 | 180 | 230 | 234 | 233 | 233 | 229 | 232 | 247 | 247 | 246 |
| 14 | 183 | 184 | 180 | 231 | 235 | 232 | 245 | 244 | 246 | 266 | 267 | 265 |
| 15 | 180 | 182 | 179 | 232 | 235 | 230 | 251 | 248 | 251 | 274 | 275 | 273 |
| 16 | 179 | 181 | 178 | 232 | 235 | 229 | 252 | 249 | 250 | 282 | 283 | 280 |
| 17 | 178 | 181 | 176 | 232 | 234 | 228 | 252 | 250 | 249 | 286 | 289 | 284 |

Les mesures en grammes (g).

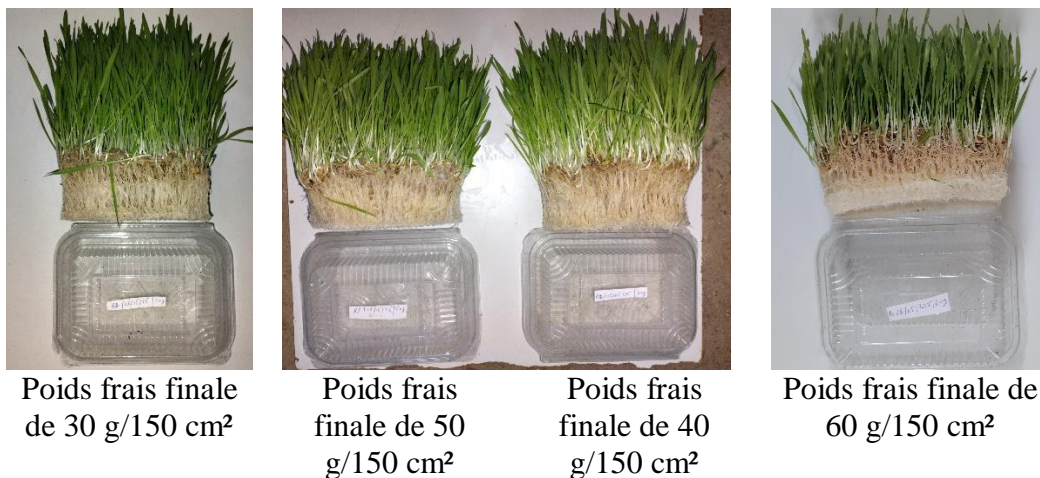


Figure VI.4 : Résultats de la culture de l'orge hors sol pour différentes densités et quantités minimales d'irrigation dqns le jour 15.
(Photographie personnelle)



De haut en bas, de droite à gauche, l'une des répétitions de culture de poids de 60 g d'orge, suivie d'une boîte de répétitions de culture de poids de 30 g d'orge. En partant du bas, une boîte de culture de 50 g suivie d'une boîte de culture de 40 g d'orge.

Figure VI.5 : Orge avec des poids initiaux différents le premier jour (Photographie personnelle)

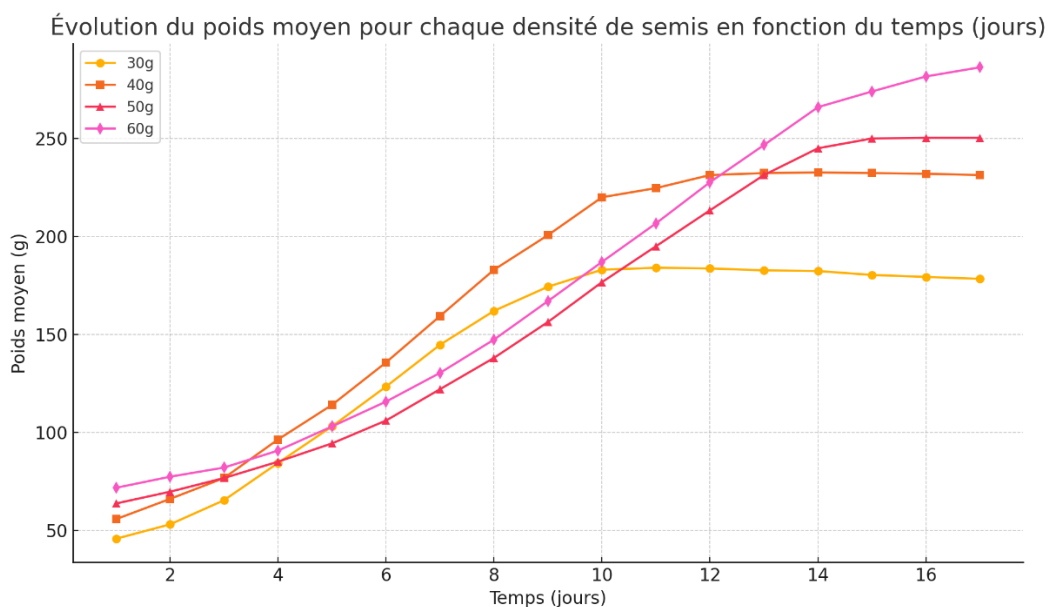


Figure VI.6 : Evolution du poids moyen pour chaque densité de semis en fonction du temps (jour).

Le graphique illustre la croissance moyenne du poids frais des plantules d'orge sur une période de 17 jours pour quatre densités de semis. On observe une tendance générale de croissance progressive jusqu'à un certain point, suivie d'un léger plateau ou d'une stabilisation.

- **Densité 30g/150 cm²** : La croissance est continue jusqu'au jour 11 (~185g), après quoi le poids reste stable, indiquant une phase de maturité ou de saturation du système.
- **Densité 40g/150 cm²** : Le développement est légèrement plus soutenu, avec un pic atteint au jour 13 (~234g), puis une stabilisation sans réelle diminution.

- **Densité 50g/150 cm²** : Bien que la croissance soit initialement modérée, elle progresse jusqu'au jour 15 (~251g), ce qui indique un rendement maximal atteint plus tardivement.
- **Densité 60g/150 cm²** : Cette densité présente la croissance la plus importante et la plus prolongée, atteignant un maximum vers le jour 17 (~286g), sans signe évident de stagnation ou de régression.

Tableau VI.6 montre le poids frais total (grammes) après 12 jours :

| Densité initiale | Poids final (g) | Gain total (g) | Taux de croissance (× poids initial) |
|-------------------------|-----------------|----------------|--------------------------------------|
| 30 g/150cm ² | 182 g | +152 g | 6,07× |
| 40 g/150cm ² | 233 g | +193 g | 5,82× |
| 50 g/150cm ² | 246 g | +196 g | 4,92× |
| 60 g/150cm ² | 265 g | +205 g | 4,42× |

Le rendement absolu (poids final) est le plus élevé à 60 g, mais le rendement relatif par gramme semé diminue avec la densité.

Tableau VI.7 montre le croissance longitudinale (jour 12) :

| Densité | Longueur moyenne des racines (mm) | Longueur moyenne des tiges (mm) |
|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 30 g/150cm ² | 91 mm | 140 mm |
| 40 g/150cm ² | 83 mm | 122 mm |
| 50 g/150cm ² | 74 mm | 108 mm |
| 60 g/150cm ² | 66 mm | 92 mm |

- La croissance en longueur est inversement proportionnelle à la densité de semis (corrélation négative).
- L'écart-type des mesures est plus faible à densité élevée, suggérant une compétition uniforme entre plantules.
- L'indice de compétitivité augmente au-delà de 40 g/150 cm², entraînant une réduction des ressources par plantule.

VI.2.1.2 Discussion

Après avoir appliqué l'analyse ANOVA à l'aide du programme Python sur toutes les données du tableau, qui est l'évolution du poids frais de l'orge germée avec différents poids initiaux et avec trois répétitions pour chaque poids, le tableau suivant a été extrait :

Tableau VI.8 : Analyse ANOVA du poids frais quotidien de l'orge germée en fonction des densités de semis

| Jour | F-Statistique | p-value | Signification statistique |
|------|---------------|---------------|---------------------------|
| 1 | 234.32 | < 0.000001 | ☑ Significatif |
| 2 | 116.21 | < 0.000001 | ☑ Significatif |
| 3 | 31.13 | < 0.0001 | ☑ Significatif |
| 4 | 22.19 | 0.0003 | ☑ Significatif |
| 5 | 68.74 | < 0.00001 | ☑ Significatif |
| 6 | 125.66 | < 0.000001 | ☑ Significatif |
| 7 | 404.82 | < 0.0000001 | ☑ Significatif |
| 8 | 728.89 | < 0.00000001 | ☑ Significatif |
| 9 | 178.50 | < 0.000001 | ☑ Significatif |
| 10 | 245.38 | < 0.000001 | ☑ Significatif |
| 11 | 147.11 | < 0.000001 | ☑ Significatif |
| 12 | 422.33 | < 0.0000001 | ☑ Significatif |
| 13 | 611.27 | < 0.0000001 | ☑ Significatif |
| 14 | 1421.71 | < 0.000000001 | ☑ Significatif |
| 15 | 1496.46 | < 0.000000001 | ☑ Significatif |
| 16 | 1379.47 | < 0.000000001 | ☑ Significatif |
| 17 | 1000.23 | < 0.00000001 | ☑ Significatif |

Les résultats démontrent que l'augmentation de la densité de semis influence significativement la croissance de l'orge germée, tant en poids qu'en morphologie. À faible densité (30–40 g/150cm²), les plantules disposent de plus d'espace, d'oxygène, et d'accès à l'eau, ce qui favorise une croissance plus vigoureuse des racines et des tiges. Cela s'explique par :

- Une compétition moindre pour la lumière et les ressources.
- Une meilleure aération, essentielle pour les racines en croissance.
- Une répartition homogène de l'eau d'irrigation.

Cependant, bien que la croissance unitaire (par plantule) soit plus importante à basse densité, le rendement global en biomasse est maximal à des densités plus élevées (50–60 g/150cm²), ce qui peut être préférable pour une production à grande échelle.

Les résultats du test de **Tukey**, appliqué aux différentes paires de densités de semis (30 g/150cm², 40g/150cm², 50 g/150cm², 60 g/150cm²), ont révélé des différences hautement significatives dans l'accumulation du poids frais de l'orge germée tout au long des 17 jours de l'expérimentation. La majorité des comparaisons entre groupes présentaient une **valeur p inférieure à 0,001**, indiquant un effet clair de la densité de semis sur la performance de croissance. Toutefois, l'analyse plus fine des différences moyennes montre que **la paire 40 g/150cm²–50g/150cm² présente systématiquement l'écart le plus faible**, avec une différence

moyenne n'excédant pas 8 à 25g selon les jours, ce qui est nettement inférieur aux écarts observés entre les autres paires.

Cette tendance est également mise en évidence dans la représentation graphique des différences moyennes aux jours 12 et 17 (**Figure VI.7**). Bien que l'ensemble des différences augmente entre ces deux points dans le temps, le contraste entre les densités 40g/150cm² et 50g/150cm² reste relativement modeste, surtout comparé à l'écart marqué entre 30 g/150cm² et 60 g/150cm² (jusqu'à 108g au jour 17). Cette proximité de performance entre 40g/150cm² et 50/150cm² suggère une **zone de transition critique** dans laquelle la densité de semis atteint un seuil d'optimisation de la croissance.

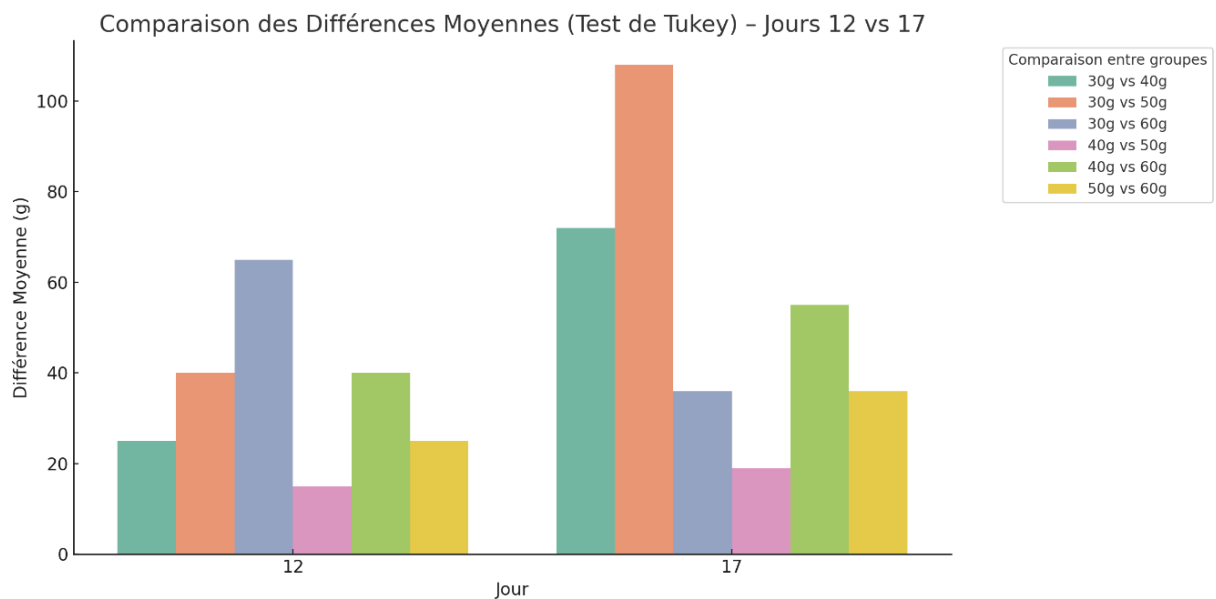


Figure VI.7 : Comparaison des différences moyennes (test de **Tukey**) – jour 12 et 17.

En raison de cette observation, il a été jugé pertinent d'approfondir l'étude en ciblant spécifiquement les deux densités 40g/150 cm² et 50g/150 cm², afin d'explorer de manière plus détaillée les dynamiques de croissance, les réponses physiologiques et la compétitivité des plantules dans cette fourchette étroite. Un tel approfondissement permettra de déterminer avec plus de précision la densité optimale assurant un rendement élevé au moment optimal tout en maintenant une utilisation efficiente des ressources (eau, lumière, espace)

D'un autre côté, se fier uniquement aux résultats statistiques pour déterminer le meilleur poids initial peut être trompeur, car les différentes densités de semis présentent des caractéristiques morphologiques variables selon le poids utilisé. Par exemple, pour la densité de 60 g/150 cm², plusieurs signes négatifs ont été observés au cours des trois répétitions, tels que le jaunissement des feuilles, des odeurs désagréables pouvant indiquer un début de pourriture, ainsi qu'un nanisme évident. En revanche, la densité de 30 g/150 cm², bien que dépourvue de ces symptômes, a révélé une fragilité structurelle marquée des plantules.

La densité de 60 g/150 cm² montre des signes évidents de saturation physiologique, se manifestant non seulement par une réduction notable de la longueur des organes probablement due à une compétition racinaire excessive et à un déficit en oxygène dissous mais aussi par des symptômes visuels clairs. En effet, la majorité des plateaux de cette densité présentent un jaunissement des extrémités foliaires, un encombrement important des jeunes pousses, ainsi qu'un nombre notable de graines non germées visibles en surface, qui se détachent ou tombent souvent lors de la manipulation quotidienne des échantillons



Figure VI.8 : Le jaunissement des feuilles apparaît dans les boîtes de culture de graines d'orge de 60 g. (Photographie personnelle)

VI.2.2. Expérimentation de culture d'orge hydroponiaque avec des quantités d'irrigation doubles

VI.2.2.1 La présentation des données

Tableau VI.9 : Évolution quotidienne du poids de l'orge germée et irriguée avec une quantité double d'irrigation selon les densités de semis

| Jour | 30g/150 cm ² | | | 40g/150 cm ² | | | 50g/150 cm ² | | | 60g/150 cm ² | | |
|------|-------------------------|-----|-----|-------------------------|-----|-----|-------------------------|-----|-----|-------------------------|-----|-----|
| 1 | 46 | 48 | 44 | 56 | 57 | 57 | 67 | 69 | 66 | 76 | 74 | 78 |
| 2 | 50 | 51 | 49 | 62 | 64 | 63 | 72 | 75 | 73 | 79 | 77 | 82 |
| 3 | 57 | 58 | 55 | 67 | 69 | 67 | 76 | 79 | 76 | 81 | 80 | 86 |
| 4 | 61 | 63 | 59 | 76 | 78 | 77 | 82 | 84 | 81 | 85 | 83 | 89 |
| 5 | 65 | 66 | 62 | 81 | 82 | 83 | 88 | 91 | 86 | 87 | 86 | 91 |
| 6 | 69 | 69 | 67 | 88 | 90 | 91 | 92 | 95 | 90 | 91 | 90 | 94 |
| 7 | 71 | 72 | 69 | 91 | 94 | 95 | 97 | 101 | 94 | 95 | 95 | 99 |
| 8 | 74 | 77 | 75 | 95 | 97 | 98 | 104 | 104 | 99 | 97 | 98 | 102 |
| 9 | 77 | 82 | 80 | 101 | 102 | 103 | 108 | 106 | 104 | 100 | 101 | 104 |
| 10 | 79 | 84 | 83 | 103 | 104 | 104 | 113 | 112 | 110 | 102 | 103 | 106 |
| 11 | 81 | 89 | 87 | 106 | 107 | 106 | 117 | 114 | 112 | 105 | 103 | 109 |
| 12 | 82 | 93 | 92 | 110 | 111 | 112 | 121 | 120 | 115 | 108 | 104 | 111 |
| 13 | 83 | 97 | 95 | 112 | 113 | 113 | 123 | 123 | 116 | 112 | 104 | 113 |
| 14 | 83 | 101 | 99 | 115 | 115 | 114 | 126 | 124 | 118 | 115 | 105 | 115 |
| 15 | 84 | 104 | 102 | 118 | 117 | 118 | 128 | 125 | 119 | 117 | 105 | 116 |
| 16 | 84 | 106 | 105 | 120 | 119 | 120 | 128 | 125 | 120 | 118 | 105 | 116 |
| 17 | 84 | 107 | 104 | 121 | 120 | 122 | 129 | 125 | 120 | 118 | 105 | 116 |

Les mesures en grammes (g).

VI.2.2.2 Discussion

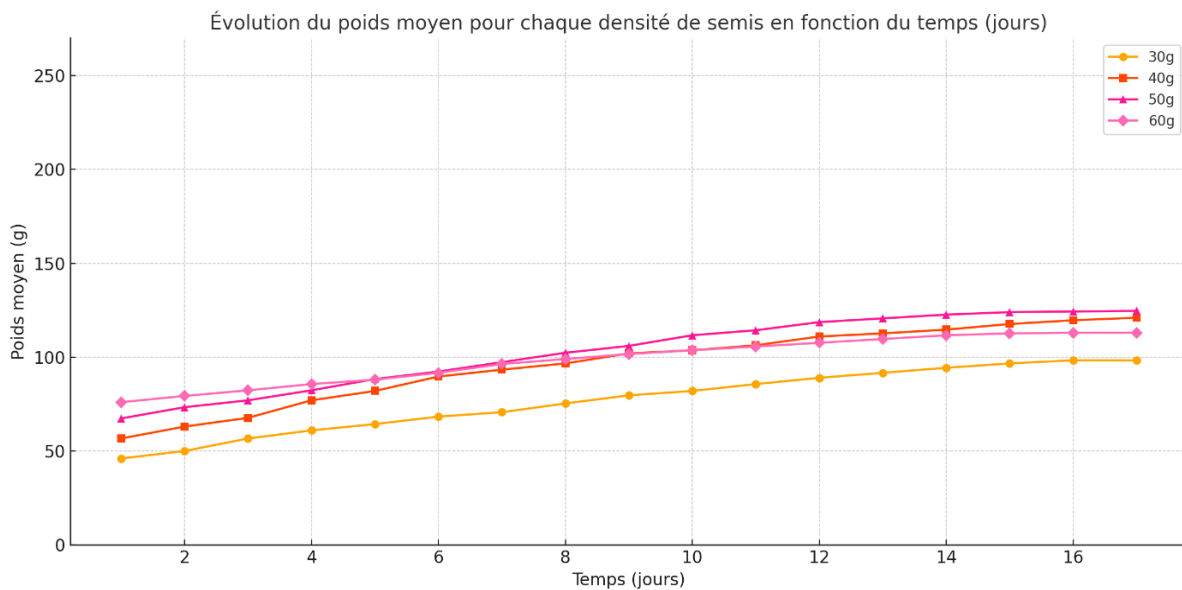


Figure VI.9 : Evolution du poids moyen pour chaque densité de semis en fonction du temps (jours)

Les données représentées dans le graphique montrent que les densités élevées (60g/150 cm² et 50g/150 cm²) ont entraîné une augmentation significative du poids moyen des plantes par rapport aux densités plus faibles (30g/150 cm² et 40g/150 cm²), notamment au cours des dix premiers jours, ce qui reflète une bonne exploitation des ressources disponibles au début de la croissance. Toutefois, cette dynamique positive n'a pas été maintenue dans les jours suivants. À partir du onzième jour, des signes de détérioration sont apparus, notamment des pourritures au niveau des racines, des odeurs nauséabondes marquées, et un noircissement des tissus racinaires, signes clairs d'un déséquilibre dans le milieu de culture.

Ces anomalies sont en grande partie dues à un excès d'irrigation, particulièrement problématique en conditions de forte densité, où l'aération est réduite et l'humidité reste piégée autour du système racinaire. Ce contexte favorise le développement de micro-organismes pathogènes et diminue la disponibilité en oxygène, provoquant ainsi une asphyxie des racines et un ralentissement de l'absorption des nutriments (Fisher, 2007). L'interaction entre surdensité et excès d'eau a donc accentué ces effets néfastes, notamment dans le traitement à 60g/150 cm².



Figure VI.10 : Pourriture des racines due à un arrosage excessif. (Photographie personnelle)

Il convient toutefois de noter qu'une irrigation excessive limite considérablement la croissance des racines (Figure VI.10), car on peut observer que le système racinaire devient moins haut et plus désireux de s'allonger. Cela s'explique par le fait que la plante se contente des ressources en eau à proximité, ce qui ne l'incite pas à s'allonger verticalement à la recherche de ressources en eau. (Hopkins, 2003)



Figure VI.11 : Orge hydroponique, irriguée avec des quantités d'irrigation doubles.

(Photographie personnelle)

Par ailleurs, bien que les densités plus faibles (30g/150 cm² et 40g/150 cm²) n'aient pas atteint des poids aussi élevés, elles ont également montré certains signes de stress physiologique, mais de manière moins sévère. On a notamment observé des odeurs désagréables et une coloration brunâtre sur les extrémités des racines, indiquant que l'irrigation excessive a affecté toutes les conditions expérimentales, bien qu'à des degrés variables.

Les écarts entre répétitions restent généralement faibles, sauf pour 60g/150 cm² (ex : Jour 8 : 97 vs 102), indiquant une légère variabilité expérimentale.

Comparaison clé:

- 30g/150 cm² vs 50g/150 cm² : La différence passe de +30% (Jour 1) à +52% (Jour 12).
- 50g/150 cm² vs 60g/150 cm² : L'avantage de la 50g se maintient après Jour 12, malgré la stagnation des deux groupes.

VI.3 Analyse comparative des essais en boîtes multiples (densités 40 g et 50 g)

VI.3.1 Résultats statistiques : poids frais, écart-type et homogénéité

Les Tableaux VI.10 et VI.11 présentent les résultats d'expériences réalisées sur dix boîtes (B1 à B10) pour deux densités de semis : 40 g/150 cm² (Tableau VI.10) et 50 g/150 cm² (Tableau VI.11), cultivées dans des conditions contrôlées de température (20–23 °C), d'humidité et d'éclairage (15 heures par jour). Les poids frais enregistrés quotidiennement ont permis de calculer la moyenne journalière, le gain de masse par rapport au jour précédent, ainsi que l'écart-type, indicateur crucial de la variabilité entre réplicats.

Tableau VI.10 : Évolution du poids de l'orge germée – Densité 40g/150 cm² – 10 boîtes –
T° : 20–23°C

| Jour | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | B8 | B9 | B10 | LMR | LMT | Moy | PP | L'écart type | CV |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|-------|--------------|-------|
| 0 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 0 | 0 | 40.00 | 0 | 0.00 | 0.00% |
| 1 | 57 | 55 | 58 | 55 | 57 | 56 | 57 | 58 | 55 | 58 | 5 | 2 | 56.60 | 16.60 | 1.26 | 2.23% |
| 2 | 66 | 68 | 65 | 67 | 66 | 65 | 66 | 65 | 66 | 65 | 11 | 5 | 65.90 | 9.30 | 0.99 | 1.29% |
| 3 | 77 | 79 | 78 | 77 | 76 | 76 | 77 | 76 | 78 | 77 | 21 | 19 | 77.10 | 11.20 | 0.99 | 1.51% |
| 4 | 97 | 95 | 95 | 97 | 95 | 95 | 97 | 97 | 97 | 95 | 34 | 30 | 96.00 | 18.90 | 1.05 | 1.10% |
| 5 | 116 | 115 | 117 | 119 | 118 | 116 | 115 | 117 | 114 | 114 | 47 | 44 | 116.10 | 20.10 | 1.66 | 1.43% |
| 6 | 137 | 135 | 139 | 136 | 137 | 136 | 137 | 139 | 138 | 137 | 58 | 65 | 137.10 | 21.00 | 1.29 | 0.94% |
| 7 | 161 | 160 | 159 | 160 | 163 | 161 | 160 | 160 | 162 | 163 | 67 | 77 | 160.90 | 23.80 | 1.37 | 0.85% |
| 8 | 184 | 181 | 183 | 182 | 185 | 182 | 185 | 185 | 182 | 184 | 75 | 92 | 183.30 | 22.40 | 1.49 | 0.82% |
| 9 | 200 | 203 | 198 | 198 | 203 | 199 | 201 | 200 | 202 | 201 | 80 | 105 | 200.50 | 17.20 | 1.84 | 0.92% |
| 10 | 222 | 224 | 222 | 221 | 223 | 222 | 219 | 219 | 218 | 222 | 84 | 113 | 221.20 | 20.70 | 1.93 | 0.87% |
| 11 | 230 | 228 | 231 | 230 | 228 | 227 | 231 | 228 | 229 | 228 | 86 | 121 | 229.00 | 7.80 | 1.41 | 0.62% |
| 12 | 233 | 231 | 234 | 232 | 232 | 236 | 235 | 230 | 231 | 231 | 87 | 127 | 232.50 | 3.50 | 1.96 | 0.84% |
| 13 | 232 | 232 | 232 | 234 | 233 | 234 | 234 | 233 | 233 | 229 | 88 | 129 | 232.60 | 0.10 | 1.51 | 0.65% |
| 14 | 231 | 229 | 230 | 233 | 233 | 230 | 228 | 230 | 231 | 228 | 89 | 133 | 230.30 | -2.30 | 1.77 | 0.77% |
| 15 | 230 | 229 | 228 | 231 | 230 | 233 | 232 | 229 | 230 | 227 | 89 | 134 | 229.90 | -0.40 | 1.79 | 0.78% |

LMT : longueur moyenne des tiges. Pp : Prise de poids. CV : Coefficient de variation.

LMR : longueur moyenne des racines. Moy : Moyenne. Les mesures en grammes (g) et (mm).



Figure VI.9 : Une boîte de répétitions de culture de 40 g d'orge dans le jour 12 (Photographie personnelle)

Tableau VI.11 : Évolution du poids frais de l'orge hydroponique – Densité 50g/150 cm² – 10 boîtes – T° : 20–23°C

| Jour | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | B8 | B9 | B10 | LMR | LMT | Moy | Pp | L'écart type | CV |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|-------|--------------|-------|
| 0 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 0 | 0 | 50.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00% |
| 1 | 63 | 63 | 59 | 62 | 61 | 62 | 59 | 65 | 61 | 63 | 5 | 2 | 61.80 | 13.00 | 1.87 | 3.03% |
| 2 | 68 | 67 | 66 | 68 | 68 | 68 | 71 | 68 | 68 | 70 | 10 | 6 | 68.20 | 7.00 | 1.40 | 2.05% |
| 3 | 74 | 74 | 75 | 76 | 74 | 74 | 75 | 76 | 73 | 75 | 19 | 17 | 74.60 | 5.00 | 0.97 | 1.30% |
| 4 | 82 | 84 | 80 | 82 | 81 | 82 | 82 | 84 | 83 | 81 | 29 | 26 | 82.10 | 6.00 | 1.29 | 1.57% |
| 5 | 91 | 93 | 93 | 94 | 92 | 94 | 92 | 91 | 92 | 92 | 40 | 41 | 92.40 | 11.00 | 1.07 | 1.16% |
| 6 | 105 | 107 | 104 | 105 | 105 | 106 | 105 | 104 | 106 | 105 | 53 | 56 | 105.20 | 13.00 | 0.92 | 0.87% |
| 7 | 121 | 119 | 120 | 121 | 121 | 121 | 120 | 121 | 120 | 122 | 63 | 66 | 120.60 | 17.00 | 0.84 | 0.70% |
| 8 | 137 | 138 | 138 | 138 | 138 | 139 | 135 | 140 | 138 | 138 | 70 | 81 | 137.90 | 16.00 | 1.29 | 0.93% |
| 9 | 156 | 158 | 159 | 157 | 155 | 158 | 156 | 159 | 157 | 156 | 75 | 88 | 157.10 | 18.00 | 1.37 | 0.87% |
| 10 | 176 | 179 | 180 | 177 | 175 | 179 | 177 | 178 | 179 | 177 | 78 | 96 | 177.70 | 21.00 | 1.57 | 0.88% |
| 11 | 193 | 196 | 197 | 195 | 197 | 194 | 195 | 193 | 194 | 196 | 80 | 101 | 195.00 | 19.00 | 1.49 | 0.76% |
| 12 | 213 | 211 | 212 | 211 | 211 | 212 | 211 | 212 | 212 | 212 | 81 | 106 | 211.70 | 16.00 | 0.67 | 0.32% |
| 13 | 228 | 230 | 228 | 228 | 230 | 230 | 230 | 229 | 228 | 228 | 82 | 108 | 228.90 | 16.00 | 0.99 | 0.43% |
| 14 | 245 | 244 | 242 | 242 | 245 | 245 | 243 | 242 | 243 | 243 | 83 | 109 | 243.40 | 15.00 | 1.26 | 0.52% |
| 15 | 251 | 252 | 250 | 249 | 253 | 251 | 250 | 252 | 251 | 250 | 83 | 110 | 250.90 | 7.00 | 1.20 | 0.48% |

LMT : longueur moyenne des tiges. **Pp** : Prise de poids. **CV** : Coefficient de variation.

LMR : longueur moyenne des racines. **Moy** : Moyenne.

Les mesures en grammes (g) et (mm).



Figure VI.10 : Une boîte de répétitions de culture de 50 g d'orge dans le jour 15.

(Photographie personnelle)

À la densité de 40 g, le poids moyen atteint un maximum de 232,6 g au jour 13, avant de légèrement décroître jusqu'à 229,9 g au jour 15. L'écart-type diminue significativement après le 11^e jour, traduisant une stabilisation du développement. À noter que la prise de poids journalière est maximale entre les jours 4 et 7, avec une moyenne de +22 g/j, avant de ralentir progressivement. L'écart-type reste modéré ($\approx 1,3$ à $1,9$), signalant un bon niveau d'homogénéité entre les unités (**Figure VI.11**)



Figure VI.11 : Homogénéité de croissance de l'orge hydroponique cultivée à une densité de 40 grammes par 150 cm². (Photographie personnelle)

À la densité de 50 g, le poids moyen culmine à 250,9 g au jour 15, montrant une productivité brute supérieure. Toutefois, l'écart-type est généralement plus élevé que celui observé à 40 g, particulièrement dans la phase finale (J10–J15), avec des valeurs allant jusqu'à 1,5 voire 1,9, ce qui indique une variabilité plus marquée entre les boîtes. Malgré une meilleure performance pondérale, la synchronisation du développement semble légèrement compromise, en raison de la densité plus élevée qui pourrait entraîner des effets de compétition intra-spécifique (accès à la lumière, à l'eau ou à l'oxygène au niveau des racines).

VI.3.2 Discussion et interprétations

Un test T pour échantillons (Tableau VI.12) indépendants a été appliqué afin de comparer les différences quotidiennes de poids frais de l'orge germée entre deux densités de semis : 40g/150cm² et 50g/150cm² de graines par unité de culture. Les résultats ont montré que les différences entre les deux groupes étaient statistiquement significatives ($p < 0,05$) pour l'ensemble des jours de l'expérience, indiquant un effet clair de la densité de semis sur la performance de croissance.

Tableau VI.12 : Résultats du test T pour échantillons indépendants comparant le poids frais quotidien de l'orge germée entre les densités de semis 40g/150cm² et 50g/150cm²

| Jour | T-Statistic | p-value | Signification statistique |
|------|-------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | -7.27 | < 0.00001 | ✓ Significatif |
| 2 | -4.24 | 0.0006 | ✓ Significatif |
| 3 | 5.70 | < 0.0001 | ✓ Significatif |
| 4 | 26.43 | < 0.0000000000001 | ✓ Significatif |
| 5 | 37.84 | < 0.000000000000001 | ✓ Significatif |
| 6 | 63.80 | < 0.0000000000000000001 | ✓ Significatif |
| 7 | 79.20 | < 0.00000000000000000001 | ✓ Significatif |
| 8 | 72.80 | < 0.000000000000000000001 | ✓ Significatif |
| 9 | 59.80 | < 0.000000000000000000001 | ✓ Significatif |
| 10 | 55.29 | < 0.000000000000000000001 | ✓ Significatif |
| 11 | 52.32 | < 0.000000000000000000001 | ✓ Significatif |
| 12 | 31.76 | < 0.0000000000001 | ✓ Significatif |
| 13 | 6.48 | < 0.00001 | ✓ Significatif |
| 14 | -19.06 | < 0.0000000000001 | ✓ Significatif |
| 15 | -30.81 | < 0.0000000000001 | ✓ Significatif |

Durant les deux premiers jours, les valeurs négatives du T-statistique (-7,27 et -4,24 respectivement) indiquent que le poids frais était légèrement plus élevé dans le groupe 40g/150cm². Cela peut s'expliquer par des conditions d'enracinement initial plus favorables avec une densité plus faible, permettant une meilleure disponibilité de la lumière, de l'espace et de l'eau pour chaque graine.

Cependant, à partir du troisième jour, les différences se sont inversées en faveur du groupe 50g/150cm². La valeur de T a augmenté de manière marquée, atteignant des niveaux très élevés à partir du jour 4 (T = 26,43) jusqu'au jour 12 (T = 31,76). Cette tendance traduit une supériorité nette du groupe à 50g/150cm² en termes de production biomasse pendant la phase active de croissance.

Toutefois, à la fin du cycle (jours 14 et 15), les valeurs de T redeviennent négatives (-19,06 et -30,81), signalant une diminution du poids frais dans le groupe 50g/150cm² par rapport au 40g/150cm². Ce phénomène pourrait être attribué à une augmentation de la compétition inter-plantes pour les ressources, menant à un stress physiologique et à un début de déclin de la biomasse fraîche.

Sur la base des données et des résultats expérimentaux obtenus, La densité de 40g/150cm² s'est révélée la plus adaptée pour la production d'aliments verts, en combinant

rendement et qualité morphologique. Au jour 12, elle a atteint un poids moyen de 233 g contre 211,7 g pour la densité de 50 g. De plus, elle a permis un meilleur développement morphologique : la longueur moyenne des tiges (LMT) était de 127 mm pour 40 g/150cm², contre 106 mm pour 50 g/150cm², et celle des racines (LMR) de 87 mm contre 81 mm. Cette différence s'explique par une moindre compétition entre les plantules à faible densité, facilitant l'accès à la lumière, à l'eau et à l'espace. Ainsi, la densité de 40 g/150cm² offre une croissance plus équilibrée et un fourrage de meilleure qualité en seulement 10 jours.

VI.4 Effet des conditions environnementales sur la croissance de l'orge germée

Une expérience a été menée dans une serre à température constante de 32 à 34 °C avec une densité initiale de 40 g/150cm² de graines d'orge semées dans des boîtes de 150 cm². Les résultats sont rapportés dans le Tableau VI.13 et montrent l'évolution du poids frais quotidien des dix réplicats.

VI.4.1 Présentation des données

Tableau VI.13 L'évolution du poids frais quotidien des dix réplicats avec une densité initiale de 40 g/150cm² de graines d'orge dans une serre à température constante de 32 à 34 °C

| Jour | B01 | B02 | B03 | B04 | B05 | B06 | B07 | B08 | B09 | B10 | Moy | Écart type | CV |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|------------|-------|
| 0 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40.00 | 0.00 | 0.00% |
| 1 | 54 | 56 | 57 | 56 | 57 | 53 | 54 | 56 | 55 | 57 | 55.50 | 1.43 | 2.58% |
| 2 | 62 | 60 | 64 | 62 | 65 | 61 | 62 | 65 | 64 | 65 | 63.00 | 1.83 | 2.90% |
| 3 | 73 | 66 | 71 | 70 | 70 | 69 | 68 | 68 | 73 | 68 | 69.60 | 2.27 | 3.26% |
| 4 | 78 | 71 | 77 | 78 | 76 | 73 | 73 | 75 | 78 | 71 | 75.00 | 2.83 | 3.77% |
| 5 | 78 | 76 | 80 | 76 | 80 | 75 | 77 | 76 | 79 | 73 | 77.00 | 2.26 | 2.94% |
| 6 | 78 | 77 | 84 | 73 | 83 | 78 | 78 | 78 | 80 | 76 | 78.50 | 3.21 | 4.08% |
| 7 | 81 | 80 | 86 | 73 | 82 | 78 | 81 | 80 | 81 | 77 | 79.90 | 3.41 | 4.27% |
| 8 | 79 | 76 | 82 | 71 | 79 | 74 | 77 | 77 | 76 | 74 | 76.5 | 3.10 | 4.05% |
| 9 | 74 | 71 | 78 | 69 | 76 | 73 | 72 | 74 | 75 | 71 | 73.30 | 2.67 | 3.64% |
| 10 | 71 | 68 | 76 | 65 | 74 | 69 | 67 | 69 | 72 | 67 | 69.80 | 3.43 | 4.91% |

CV : Coefficient de variation.

Moy : Moyenne. Les mesures en grammes (g).



Figure VI.12 : Trois différentes boîtes d'orge cultivées sous serre au jour 4.
(Photographie personnelle)

Tableau VI.14 : Analyse du poids moyen.

| Jour | Poids frais moyen (g) | Gain quotidien moyen (g) |
|------|-----------------------|--------------------------|
| 0 | 40.00 | - |
| 1 | 55.50 | +15.50 |
| 2 | 63.00 | +7.50 |
| 3 | 69.60 | +6.60 |
| 4 | 75.00 | +5.40 |
| 5 | 77.00 | +2.00 |
| 6 | 78.50 | +1.50 |
| 7 | 79.90 | +1.40 |
| 8 | 76.50 | -3.40 |
| 9 | 73.30 | -3.20 |
| 10 | 69.80 | -3.50 |

On observe un pic de croissance rapide durant les trois premiers jours, suivi d'un ralentissement, puis d'un déclin progressif du poids après le 7e jour.

VI.3.2 Analyse comparative

Comparons ces résultats à ceux obtenus à température modérée (20–23 °C) avec la même densité :

Tableau VI.15 : Effet de la température sur la croissance de l'orge germée (densité 40 g/150 cm²).

| Paramètre | Temp. Modérée | Temp. Élevée (serre) |
|-----------------------------|---------------|----------------------|
| Poids final au jour 10 | 221.20 g | 69.80 g |
| Croissance cumulée (g) | +181.20 g | +29.80 g |
| Longueur racines au jour 10 | ~84 mm | — |
| Longueur tiges au jour 10 | ~113 mm | — |

VI.3.3 Discussion

Les résultats indiquent que les températures élevées (32–34 °C) nuisent significativement à la croissance de l'orge germée en conditions contrôlées. Plusieurs mécanismes physiologiques peuvent expliquer ce phénomène:

- **Accélération du métabolisme** : Les températures élevées provoquent une consommation rapide des réserves de la graine, ce qui entraîne un épuisement prématuré du potentiel de croissance. (**Fisher, 2007**)
- **Stress hydrique latent** : Malgré une irrigation constante, l'évaporation rapide augmente le déficit hydrique, limitant la turgescence cellulaire nécessaire à l'élongation des tissus. (**Hopkins, 2003**)
- **Inhibition enzymatique** : Certaines enzymes liées à la croissance (comme l' α -amylase) ont une plage optimale de fonctionnement entre 20 et 28 °C. Au-delà, leur activité diminue, réduisant l'efficacité de mobilisation des sucres. (**Cook, 2013**)
- De plus, la durée de vie physiologique de l'orge germée est raccourcie sous forte chaleur (**Cook, 2013**), ce qui explique le déclin du poids après le 7^e jour, probablement dû à des pertes d'eau, au flétrissement et à la dégradation partielle des tissus.

Les conditions de température élevées (32–34 °C) observées en serre entraînent un développement nettement inférieur en poids comparé aux conditions contrôlées (20–23 °C avec lumière artificielle 14h/jour). Une température modérée, couplée à un contrôle de l'humidité et une photopériode suffisante, est donc essentielle pour maximiser le rendement et la qualité de l'orge germée.

VI.5 Recommandations pour l'optimisation d'une unité de production d'orge hydroponique

4.1 Synthèse des résultats expérimentaux

Les résultats obtenus dans le cadre des différentes expériences ont permis d'identifier les paramètres optimaux pour la culture de l'orge hydroponique. Parmi les densités testées (30 g, 40 g, 50 g et 60 g pour une surface de 150 cm²), la densité de 40 g/150cm² s'est révélée la plus équilibrée, tant sur le plan du rendement pondéral que sur celui du développement morphologique des tiges et racines.

- **Densité de semis optimale** : La densité de 40 g/150 cm² a permis d'obtenir un poids frais moyen final d'environ 229,9 g au jour 10-11, avec une longueur moyenne des tiges de 134 mm et des racines de 89 mm, sans présenter de signes de saturation ou de compétition excessive.
- **Photopériode** : Une lumière blanche artificielle de 14 heures par jour reste indispensable pour soutenir une croissance homogène.

- **Température** : Le maintien d'une température de 20 à 23 °C a permis une germination et un allongement végétatif optimal. À l'inverse, une température plus élevée (32–34 °C, dans la serre) a entraîné une baisse progressive du poids dès le 7^e jour.
- **Durée de culture recommandée** : Un cycle de 10 à 11 jours a été défini comme optimal avant le début de la sénescence et la baisse de qualité observées au-delà du 12^e jour.
- **Irrigation**: 20 ml/jour (jours 1–3), puis 30 ml/jour (jours 4–11) pour la densité de 40 g/150cm².

L'irrigation doit être répartie sur deux apports quotidiens pour éviter les excès ou la dessiccation.

VI.5.2 Conception d'une unité améliorée de production de fourrage vert d'orge hors-sol dans une salle de culture de 4 m x 9 m x 4 m

VI.5.2.1 Aménagement spatial et étagères de culture

La salle est aménagée pour permettre une circulation fluide entre les structures de culture. Sur les 36 m² disponibles, une partie est réservée à la circulation. On installe 6 armoires, chacune comportant 7 niveaux espacés de 50 cm pour garantir un bon éclairage entre les niveaux.

- Dimensions de chaque niveau : 4 m (longueur) × 0,9 m (largeur) = 3,6 m²
- Chaque niveau peut accueillir 8 plateaux standards (100 × 55 cm) = 56 plateaux par armoire.
- Capacité totale : 336 plateaux pour les 6 armoires

VI.5.2.2 Densité de semis recommandée

Les expériences ont montré que la densité optimale pour un bon développement du fourrage, en termes de biomasse et de longueur des pousses, est de 40 g pour 150 cm², soit une densité de 2,67 g/10 cm².

- Pour un plateau de 100 cm × 55 cm = 5500 cm², la quantité de semences optimale est : $(5500/150) \times 40 \text{ g} = 1467 \text{ g} \approx \mathbf{1,47 \text{ kg de graines d'orge par plateau}}$.

- Ainsi, pour 240 plateaux, il faut environ :

$336 \times 1,47 = \mathbf{494,0 \text{ kg de graines d'orge par cycle}}$.

VI.5.2.3 Système d'irrigation en circuit fermé

Le système d'irrigation est basé sur un circuit fermé pour limiter la consommation d'eau :

- Jours 1 à 3 : besoins journaliers par plateau $\approx 20 \text{ ml} \times 36,7 = 734 \text{ ml} \approx 0,73 \text{ L}$.
- Jours 4 à 11 : besoins journaliers par plateau $\approx 30 \text{ ml} \times 36,7 = 1,1 \text{ L}$.

Pour 336 plateaux, cela donne :

- Jours 1–3 : $336 \times 0,73 \text{ L} \approx 245 \text{ L/jour}$
- Jours 4–11 : $336 \times 1,1 \text{ L} \approx 370 \text{ L/jour}$

L'eau est distribuée via une pompe à pression moyenne (2 à 3 bars) et des tuyaux goutte-à-goutte, avec récupération de l'excédent dans des bacs de collecte. Un filtre à charbon ou UV permet le recyclage de l'eau.

VI.5.2.4 Éclairage horticole

Des lampes LED blanches linéaires d'une puissance de 40 à 50 watts peuvent convenir pour fournir l'éclairage nécessaire à la croissance des plantes, surtout si elles sont réparties en 20 unités le long des murs de la pièce, de manière à assurer une bonne répartition de la lumière sur tous les plateaux.

VI.5.2.5 Conditions climatiques

- Température : 20–23 °C, régulée par thermostat + extracteurs + chauffage d'appoint.
- Humidité : 60–70 %, contrôlée via humidificateurs à sonde.
- Ventilation douce : circulation d'air via ventilateurs à basse vitesse.

Conclusion et perspectives

CONCLUSION GENERALE

La présente étude s'est inscrite dans une démarche expérimentale visant à explorer les potentialités de la culture hydroponique de l'orge pour la production de fourrage vert dans des conditions sobres en ressources. Dans un contexte marqué par la rareté croissante de l'eau, la dégradation des sols et les exigences croissantes de l'élevage, cette alternative présente un intérêt stratégique, en particulier pour les zones arides et semi-arides d'Algérie.

Les résultats obtenus ont mis en évidence l'efficacité de ce système en termes de vitesse de croissance, de rendement en poids frais, et d'économie en eau. Il a été démontré qu'une densité de semis modérée (40 g/150 cm²), associée à une irrigation minimale et à une température contrôlée, permet d'atteindre un rendement optimal en un cycle court de 10 à 12 jours. Ces résultats confirment la faisabilité d'une unité de production artisanale de fourrage, reproductible localement sans recours à des technologies complexes.

Bien que l'étude ne comprenne pas d'analyses chimiques approfondies, les observations de croissance ainsi que les références bibliographiques fiables permettent de supposer une qualité nutritionnelle comparable à celle rapportée dans la littérature pour l'orge germée. Ce travail constitue donc une base pour le développement de micro-systèmes de production de fourrage vert, adaptés aux éleveurs disposant de moyens limités.

Les contraintes matérielles ont limité certains volets du travail, notamment l'analyse nutritionnelle directe ou la modélisation économique détaillée. Néanmoins, l'approche expérimentale adoptée offre une méthodologie reproductible et adaptable à d'autres contextes ou espèces fourragères.

Perspectives

Pour approfondir et valoriser les résultats de cette étude, plusieurs axes de recherche et d'application peuvent être envisagés :

- Réaliser des analyses nutritionnelles complètes (protéines, fibres, antioxydants) sur les pousses d'orge produites en hydroponie afin de confirmer leur valeur alimentaire.
- Étudier l'impact zootechnique du fourrage obtenu sur les animaux d'élevage : croissance, digestibilité, état de santé, et performances productives.

- Comparer l'orge à d'autres espèces fourragères cultivées en hydroponie telles que la luzerne, l'avoine, le maïs ou le coton germé, afin d'évaluer leur comportement agronomique, leur valeur nutritionnelle et leur rentabilité.
- Explorer la faisabilité de systèmes rotatifs ou multi-espèces, visant à assurer une diversité de production tout au long de l'année.
- Concevoir un modèle économique simplifié, prenant en compte les coûts de production, les rendements au mètre carré et le retour sur investissement pour les petits agriculteurs.
- Intégrer ce modèle dans des programmes de vulgarisation agricole et de formation, afin de diffuser cette innovation auprès des petits exploitants et de renforcer leur autonomie alimentaire.
- Étudier la possibilité de transformer le fourrage vert frais en granulés (granulés de pousses d'orge) dans le but d'améliorer sa conservation, de prolonger sa durée de stockage, de faciliter sa distribution, et de le mélanger avec d'autres compléments alimentaires selon les besoins spécifiques des éleveurs.

Recommandations et valorisation du modèle

À la lumière des résultats obtenus, plusieurs recommandations pratiques peuvent être formulées en vue d'optimiser l'usage de la culture hydroponique d'orge comme alternative de production de fourrage vert :

- Adopter une densité de semis de 40 g/150 cm², permettant un équilibre entre rendement élevé et bonne aération des pousses.
- Limiter l'irrigation à 30 ml/jour, répartis sur deux apports, afin de maximiser l'efficacité hydrique tout en évitant l'excès d'humidité propice aux moisissures.
- Maintenir la température ambiante entre 20 et 25 °C, notamment en saison chaude, par l'aide d'un thermostat numérique, de chauffages d'appoint et d'un système de ventilation/extraction d'air.
- Procéder à la récolte entre le 10^e et le 12^e jour, période où la biomasse est à son optimum, tout en conservant une structure de fourrage adaptée à la consommation animale.

Ces recommandations visent à transformer l'expérimentation menée en solution opérationnelle, durable et accessible, contribuant à la souveraineté alimentaire et à la résilience des systèmes d'élevage dans les zones vulnérables d'Algérie.

Références bibliographiques

- Abdelguerfi, A., Laouar, M., M'Hammedi Bouzina, M., INA, B. E. H. A., INRAA, S. M. B., & Alger, B. (2008). Les productions fourragères et pastorales en Algérie: Situation et possibilités d'amélioration. *Agriculture & Développement*, 6, 14–25.
- AMMARI, A., & KHELIL, I. (2020). Essai sur la culture de laitue (*Lactuca sativa*) sous un système hydroponique dans la région de Ouragla (Doctoral dissertation). Université de Ouargla.
- Badr, A., Sch, R., Rabey, H. E., Effgen, S., Ibrahim, H. H., Pozzi, C., ... & Salamini, F. (2000). On the origin and domestication history of barley (*Hordeum vulgare*). *Molecular Biology and Evolution*, 17(4), 499–510.
- Baumont, R., Aufrère, J., & Meschy, F. (2009). La valeur alimentaire des fourrages: Rôle des pratiques de culture, de récolte et de conservation. *Fourrages*, 198(198), 153–173.
- Benabdeljelil, K. (1999, avril). Transfert de technologie en agriculture. *Bulletin de liaison et d'information du PNTTA*, (55).
- Blanc, D. (Éd.). (1987). *Les cultures hors sol* (2e éd.). INRA.
- Brink, M., Belay, G., & De Wet, J. M. J. (2006). Plant resources of tropical Africa 1: Cereals and pulses (pp. 54–57). Wageningen: PROTA Foundation.
- Cook, A. H. (Ed.). (2013). *Barley and malt: Biology, biochemistry, technology* (pp. 1–756). Elsevier.
- Couturier, L., & Sartory, A. (1931). *Encyclopédie agricole* (Vol. 1). Quillet.
- Depositphotos. *Seven Wonders of the Ancient World – Hanging Gardens of Babylon* (ID: 273947750). Disponible sur: <https://depositphotos.com/fr/vector/seven-wonders-of-the-ancient-world-hanging-gardens-of-babylon-the-great-construction-of-the-273947750.html>
- Djerah, A., & Oudjehih, B. (2016). Effet du stress salin sur la germination de seize variétés d'orge (*Hordeum vulgare* L.). *Courrier du Savoir*, 20, 47–56.
- Fisher, J. (2007). The biology of *Hordeum vulgare* L. *Journal of the Office of the Gene Technology Regulator*, pp. 19–20.

- Ghelem-Djender, Z., Kasad, K., Bouziri, S., Boukhobza, N., Oumedjekane, K., Mahieddine, D., & Ait Ghezali, A. (2019). Les grandes cultures en chiffres [Brochure] (Conception: R. Taibi). Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC), Département des Études et Programmes. <https://www.itgc.dz/wp-content/uploads/2019/12/les-grandes-cultures-en-chiffre2019.pdf>
- Grains Canada. *Identification de la fusariose*. Disponible sur : <https://www.grainscanada.gc.ca/fr/qualite-grains/classement-des-grains/facteurs-de-classement/identification-fusariose.html>
- GrowWithoutSoil. *An All-Inclusive Breakdown of Hydroponics Basics*. Disponible sur : <https://growwithoutsoil.com/an-all-inclusive-breakdown-of-hydroponics-basics/>
- Hydroponies. *Hydroponic Systems & Information*. Disponible sur: <https://www.hydroponies.com/>
- INRA Algérie. (2018–2022). Site officiel de l'INRA Algérie. <https://inraa.dz/>
- INIA – Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. *Adaptado el contenido del espigario*, IDParam=2308. Disponible sur : <https://www.inia.es/comunicacion/noticias/Pages/Adaptado-el-contenido-del-espigario-a-la-web-del-INIA.aspx?IDParam=2308>
- Issolah, R. (2008). Les fourrages en Algérie: Situation et perspectives de développement et d'amélioration. *Recherche Agronomique*, 12(22), 34–47.
- Laouali, M. N., Alassane, N. A., & Brah, N. (2020). Manuel de production et utilisation des fourrages verts hydroponiques (FVH) au Niger. INRAN-CERRA de Maradi. https://reca-niger.org/IMG/pdf/fourrages_hydroponiques_inran-3.pdf
- Ministère de l'Agriculture et du Développement rural (Algérie). (2019). Statistiques agricoles série B 2019. <https://madr.gov.dz/wp-content/uploads/2022/04/SERIE-B-2019.pdf>
- Miralles-Bruneau, M., Bigot, C. E., Benard, J. L., Barreira, S., Forget, D., Grangette, D., ... & Valin, D. (2015). Utilisation du fourrage vert hydroponique en production de viande bovine et ovine à la Réunion : une alternative pour pallier aux déficits fourragers futurs liés aux changements climatiques et au manque de foncier agricole ?

- (85 p.). ARP, Sicarévia, Ovicap, Sedaël, Chambre d'Agriculture de la Réunion, AD2R, ARIBEV, Cirad, Urcoopa.
- Murray, M., Pizzorno, J., & Pizzorno, L. (2005). *The encyclopedia of healing foods*. Atria Books.
 - Paulíčková, I., Ehrenbergerová, J., Fiedlerová, V., Gabrovská, D., Havlová, P., Holasová, M., ... & Winterová, R. (2007). Evaluation of barley grass as a potential source of some nutritional substances. *Czech Journal of Food Sciences*, 25(2), 65–72.
 - Rahal-Bouziane, H. (2015). L'orge en Algérie: Passé, présent et importance pour la sécurité alimentaire, face aux nouveaux défis. *Recherche Agronomique*, 27, 7–9.
 - RECHACHI, M., Abdelhafid, Y., Menasria, H., Mellah, A., & Hiouani, F. L. F. (2020). Étude de la salinité dans les régions arides algériennes. *Journal Algérien des Régions Arides (JARA)*, 14(1), 66–79.
 - Roy, D. (2022). Hydroponics: Soil-less farming technique. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/362519271_Hydroponics_Soil-less_Farming_Technique
 - Schilperoord, P. (2013). *Plantes cultivées en Suisse – L'orge*. Verein für alpine Kulturpflanzen.
 - The Daily Garden. “Barley.” *Garden Word of the Day*, 15 décembre 2017. Disponible sur : <https://www.thedailygarden.us/garden-word-of-the-day/barley>
 - Tüzel, Y., Gül, A., Tüzel, I. H., & Öztekin, G. B. (2019). Different soilless culture systems and their management. *Journal of Agricultural, Food and Environmental Sciences (JAFES)*, 73(3), 7–12.
 - University of Florida, IFAS Extension. *EP623: Hydroponic Lettuce Production Manual*. Gainesville, FL: Institute of Food and Agricultural Sciences, 2024. Disponible sur: <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/EP623>
 - Vitre, A. (2003). *Fondements & principes du hors-sol*. Éditions France Agricole.
 - VIVESCIA. (2022). *Cycle de l'orge* [Image]. VIVESCIA. <https://www.vivescia.com/grand-angle/tous/cereales-quel-est-le-cycle-de-orge>

- von Bothmer, R., van Hintum, T., Knüpfner, H., & Sato, K. (Eds.). (2003). Diversity in barley (*Hordeum vulgare*) (Vol. 7, pp. 3–8, 53–227). Elsevier.
- Zeng, Y., Pu, X., Yang, J., Du, J., Yang, X., Li, X., ... & Yang, T. (2018). Preventive and therapeutic role of functional ingredients of barley grass for chronic diseases in human beings. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2018(1), 3232080. <https://doi.org/10.1155/2018/3232080>

