

Faculté des bioingénieurs

Impact d'un stress hydrique sur le développement, la production et la qualité nutritionnelle des graines du sarrasin de Tartarie (*Fagopyrum tataricum*)

Auteur : Detienne Lore

Promoteur(s) : Pr. Quinet Muriel (SST/ELI/ELIA)

Lecteur(s) : Pr. Lobet Guillaume (SST/ELI/ELIA)
Luyckx Adrien (SST/ELI/ELIA)

Année académique 2023-2024

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Bioingénieur : sciences agronomiques

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord ma promotrice, Muriel Quinet, pour toute son aide, pour sa disponibilité et pour ses conseils tout au long de l'année. Je la remercie pour sa bienveillance et pour son temps investi dans mon mémoire. Sa confiance en mon travail m'a permis d'atteindre les objectifs que je m'étais fixés.

Je remercie également Corentin Defalque pour ses conseils, son aide et sa disponibilité lorsque j'avais des doutes et des blocages. Merci de m'avoir épaulée durant cette année.

Je remercie tous les membres du groupe de recherche GRPV pour leur accueil au sein du laboratoire, et grâce à qui je me suis sentie entourée et encadrée. Merci tout particulièrement à Paul, Brigitte et Marie-Eve pour leur aide lors de mes manipulations en laboratoire et en serres ainsi qu'aux doctorants Nolan, Adrien et Pauline pour leurs conseils. Je n'aurais pas pu espérer mieux comme cadre de travail et comme équipe encadrante pour réaliser mon mémoire.

Merci à mes co-mémorants Amandine, Simon et Théophile pour notre entraide au cours de cette année.

Je remercie également le Pr. Guillaume Lobet et Adrien Luyckx d'avoir accepté d'être les lecteurs de mon mémoire.

Et finalement, un grand merci à mes parents pour m'avoir soutenu et accompagné dans les moments plus difficiles comme dans les meilleurs, ainsi qu'à mes amis pour leur soutien et leur aide durant toute cette année.

Table des matières

Remerciements.....	2
Table des figures.....	5
Table des tableaux.....	7
Liste des acronymes.....	8
I. Introduction	9
II. Revue bibliographique	11
1. L'avenir de la planète et les changements climatiques globaux	11
1.1. Impact sur l'agriculture, sur les rendements	12
2. Le stress hydrique.....	13
2.1. Impacts du stress hydrique sur la physiologie et la croissance des plantes	14
3. Le sarrasin de Tartarie	17
3.1. Culture du sarrasin	17
3.2. Origine et culture du sarrasin de Tartarie	19
3.3. Description morphologique	19
3.4. Exigences écologiques	21
4. Intérêt et utilisation du sarrasin de Tartarie	22
4.1. Qualité nutritionnelle	22
4.2. Intérêt nutraceutique	23
5. Composition nutritionnelle du sarrasin de Tartarie	25
6. Résistance au stress hydrique chez le sarrasin.....	27
III. Matériels et méthodes	28
1. Matériel végétal et conditions de culture.....	28
2. Mesures de croissance non destructives.....	30
2.1. Mesures morphologiques récurrentes	30
2.2. Mesures morphologiques ponctuelles	30
3. Mesures de croissance destructives.....	31
3.1. Récoltes.....	31
3.2. Poids frais et poids secs	31
4. Mesures physiologiques	32
4.1. PNA.....	32
4.2. Mesure du potentiel osmotique	32
4.3. Teneurs en anti-oxydants (flavonoïdes et polyphénols)	33
5. Paramètres de rendement et des qualités nutritionnelles	35

5.1. Poids de 1000 grains.....	35
5.2. Teneurs en protéines	35
5.3. Teneurs en sucres solubles.....	36
5.4. Teneurs en minéraux	37
6. Analyse statistique	38
IV. Résultats.....	39
1. Paramètres environnementaux.....	39
1.1. Evolution de la température dans la serre.....	39
1.2. Evolution de l'humidité relative dans la serre.....	39
1.3. Teneur en eau de la terre des plantes	40
2. Paramètres de croissance	41
2.1. Production de feuilles	41
2.2. Production d'inflorescences.....	43
2.3. Taille finale des plantes.....	45
2.4. Nombre de ramifications final.....	46
2.5 Poids frais et poids secs	48
3. Paramètres physiologiques.....	50
3.1 Potentiel osmotique	50
3.2. Teneur relative en chlorophylle.....	50
3.3. Teneurs en polyphénols et flavonoïdes	51
4. Paramètres de rendements et qualité des graines	53
4.1. Poids de 1000 graines.....	53
4.2. Teneurs en protéines	53
4.3. Teneurs en sucres solubles.....	54
4.4. Teneurs en minéraux	55
V. Discussion.....	57
VI. Conclusion et perspectives	66
Références bibliographiques	68
VII. Annexes.....	75

Table des figures

Figure 1 : Fréquence des catastrophes naturelles rapportées dans le monde entre 1970 et 2021.....	11
Figure 2: Illustration de deux espèces de sarrasin.....	17
Figure 3 : Distribution de la production mondiale de sarrasin entre 2000 et 2022.....	18
Figure 4 : Evolution de la production mondiale de sarrasin de 1985 à 2022.....	18
Figure 5 : Illustrations de la fleur et de la graine du sarrasin commun et du sarrasin de Tartarie	21
Figure 6 : Répartitions des plantes sur la paillasse de la serre A21.....	29
Figure 7 : Schéma des 75 jours d'expérience.....	30
Figure 8 : Evolution de la température moyenne journalière dans la serre entre le 4 octobre 2023 et le 22 décembre 2023.....	39
Figure 9 : Evolution de l'humidité relative moyenne journalière dans la serre entre le 4 octobre 2023 et le 22 décembre 2023.....	39
Figure 10 : Evolution de la teneur en eau moyenne du sol mesurée au cours du temps avant l'arrosage pour chaque condition de traitement chez le sarrasin de Tartarie, variété Zlata.....	40
Figure 11 : Evolution du nombre de feuilles par condition de traitement en fonction du jour de croissance.....	41
Figure 12 : Evolution du nombre d'inflorescences par condition de traitement en fonction du jour de croissance.....	43
Figure 13 : Noeud d'apparition de la première inflorescence en fonction des différentes conditions de traitement.....	45
Figure 14 : Taille finale [cm] des plantes mesurées lors de la deuxième récolte en fonction des différentes conditions de traitement.....	45
Figure 15 : Nombre de ramifications total compté lors de la deuxième récolte en fonction des différentes conditions de traitement.....	46
Figure 16 : Nombre de feuilles moyen par ramifications en fonctions des différentes conditions de traitement.....	47
Figure 17 : Nombre d'inflorescences moyen par ramifications en fonctions des différentes conditions de traitement.....	47

Figure 18 : Potentiel osmotique mesuré lors de la deuxième récolte en fonction des différentes conditions de traitement.....	50
Figure 19 : Teneur en chlorophylle (SPAD) mesurée lors de la deuxième récolte en fonction des différentes conditions de traitement.....	50
Figure 20 : (A) Concentration en polyphénols dans les feuilles et dans les inflorescences [mg/g MF] et (B) concentration en flavonoïdes dans les feuilles et dans les inflorescences [mg/g de MF] en fonction des différentes conditions de traitement.....	52
Figure 21 : Poids de 1000 grains [g] en fonction des différentes conditions de traitement.....	53

Table des tableaux

Tableau 1 : Comparaison du contenu nutritionnel entre le sarrasin de Tartarie et le sarrasin commun pour 100 g de sarrasin.....	25
Tableau 2 : Nombre de feuilles à la deuxième récolte en fonction des conditions de traitement.....	42
Tableau 3 : Nombre d'inflorescences mesuré lors de la deuxième récolte en fonction des différentes conditions de traitement.....	44
Tableau 4 : Poids frais totaux [g], poids secs totaux [g], teneur en eau totale [%], indice de récolte [%] et indice de tolérance [%] pour les différentes conditions à la première récolte et à la deuxième récolte.....	48
Tableau 5 : Concentration en protéines [mg/g MF] mesurée dans les feuilles récoltées durant la deuxième récolte et placées à l'étuve à 30°C, en fonction des différentes conditions de traitement.....	54
Tableau 6 : Concentration en sucres solubles [mg/g MF] mesurée dans les feuilles récoltées à la deuxième récolte et placées à l'étuve à 30°C, en fonction des différentes conditions de traitement.....	55
Tableau 7 : Concentrations en minéraux [mg/g ou µg/g de MF] mesurée dans les graines récoltées à la deuxième récolte placées à l'étuve à 30°C, pour les différentes conditions de traitement.....	56

Liste des acronymes

ABA : Acide abscissique

ADN : Acide désoxyribonucléique

ANOVA : Analysis of variance

ARN : Acide ribonucléique

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

MF : Matière fraîche

ONU : Organisation des Nations unies

PNA : Plant Nutritional Analyser

ROS : Reactive Oxygen Species

VWC : Volumetric Water Content

WSB : Water Stress Beginning

WSC : Water Stress Continu

WSE : Water Stress Ending

WW : Well Watered

I. Introduction

Comme le dévoilent les rapports récents publiés par le GIEC, les changements climatiques sont désormais incontestables. Les événements météorologiques extrêmes tels que les sécheresses, les tempêtes et les inondations sont devenus plus fréquents et s'intensifient depuis les dernières décennies. Ces changements affectent aussi déjà la sécurité alimentaire mondiale, notamment par son impact direct sur l'agriculture. En effet, les rendements agricoles sont affectés par les facteurs tels que les variations climatiques, la disponibilité en eau et l'augmentation des stress abiotiques et biotiques.

C'est pourquoi il est important de comprendre comment les plantes réagissent à ces événements afin de mieux pouvoir anticiper les changements dans le futur. Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons exclusivement au stress hydrique et plus particulièrement à l'impact d'une sécheresse sur le développement, la production et les qualités nutritionnelles du sarrasin de Tartarie.

Le choix de l'étude s'est porté sur le sarrasin, une pseudo-céréale qui connaît un regain de sa consommation depuis quelques années en Europe et en Asie, grâce à ses nombreuses qualités. En effet, le sarrasin est une culture peu exigeante en termes d'entretien et d'intrants, la rendant bien adaptée à l'agriculture biologique. En plus de ses propriétés allélopathiques, le sarrasin peut aussi agir en tant qu'engrais vert et présente de nombreuses qualités nutritionnelles. Le sarrasin de Tartarie est riche en protéines de haute qualité, en fibres alimentaires, en vitamines B, en antioxydants et ne contient pas de gluten. Sa consommation présente donc de réels avantages sur la santé, notamment par ses propriétés antioxydantes et anti-inflammatoires.

La plupart des études déjà réalisées sur l'impact d'un stress hydrique sur le sarrasin de Tartarie se concentrent uniquement sur les effets d'un stress continu au cours de la croissance de la plante. Or, les plantes ont des sensibilités au stress différentes en fonction de leur stade de développement et les effets engendrés peuvent différer aussi.

Dans cette étude, nous étudierons l'impact d'un stress hydrique à différents moments de la croissance du sarrasin de Tartarie afin de comprendre les mécanismes mis en place ainsi que les impacts sur les récoltes et sur les valeurs nutritionnelles de ses graines.

Ce travail a deux objectifs :

Premièrement, l'analyse de l'impact d'un stress hydrique sur la croissance et la physiologie du sarrasin de Tartarie en fonction du moment d'application. Ce premier objectif a pour but de comparer quatre conditions de traitement (stress hydrique durant la phase végétative, stress hydrique durant la floraison, stress hydrique continu et condition témoin) sur base de mesures morphologiques (nombre de feuilles, nombre d'inflorescences, taille de la plante, poids frais et secs...) et physiologiques (contenu en eau, teneur en chlorophylles, teneur en antioxydants...)

prises à différents moments de la croissance. Cette comparaison permettra de comprendre quels effets engendrent un stress hydrique en fonction de son moment d'application et quels mécanismes le sarrasin de Tartarie met en place pour y faire face.

Le deuxième objectif de cette étude est l'analyse de l'impact d'un stress hydrique à différents moments de la croissance sur le rendement et la qualité nutritionnelle des graines chez le sarrasin de Tartarie. Grâce à l'analyse des graines de sarrasin de Tartarie récoltées en fin de culture, une comparaison du rendement (poids des graines par plante, poids de 1000 grains, indice de récolte...) et des qualités nutritionnelles (teneurs en protéines, sucres, antioxydants et minéraux) pourra être réalisée entre les différentes conditions de traitement.

II. Revue bibliographique

1. L'avenir de la planète et les changements climatiques globaux

Le 3 juin 1992 avait lieu le Sommet de la Terre à Rio de Janeiro, une conférence de l'ONU sur l'environnement et le développement, qui avait pour l'un de ses objectifs de réduire les dégradations à l'environnement global. Trente ans plus tard, les rapports publiés du GIEC montrent que les objectifs n'ont pas été atteints et, plus grave encore, que l'environnement global s'est fortement dégradé ("Journal Le Temps", 2022).

En effet, plusieurs tendances se démarquent du nouveau rapport du GIEC sorti en 2023 : la concentration mondiale de gaz à effet de serre a atteint un niveau jamais enregistré de 410 ppm en 2019, mais le taux de croissance de ces émissions a tendance à diminuer et était plus faible entre 2010 et 2019 qu'entre 2000 et 2009 (GIEC, 2023a). En 2019, 79% des émissions étaient dues aux secteurs de l'énergie, de l'industrie, des transports ainsi que des bâtiments, et 22% provenaient de l'agriculture, de la sylviculture et d'autres utilisations de terres (GIEC, 2023a). La température moyenne à la surface du globe a augmenté d'environ 1,1°C pour la période 2011-2020 depuis la période 1850-1900 (Calvin et al., 2023). Il est pratiquement certain que les chaleurs extrêmes deviennent de plus en plus fréquentes et intenses dans la plupart des régions terrestres depuis 1950 (Calvin et al., 2023). À contrario, les froids extrêmes sont moins fréquents et moins intenses (Calvin et al., 2023).

L'accroissement des phénomènes météorologiques extrêmes tels que les sécheresses, les tempêtes, les inondations et les tremblements de terre est aussi une conséquence attribuée au réchauffement climatique. (Figure 1). En effet, on compte en moyenne 372 catastrophes naturelles mondiales par an entre 2011 et 2020, contre 92 par an entre 1971 et 1980 (Brás et al., 2021).

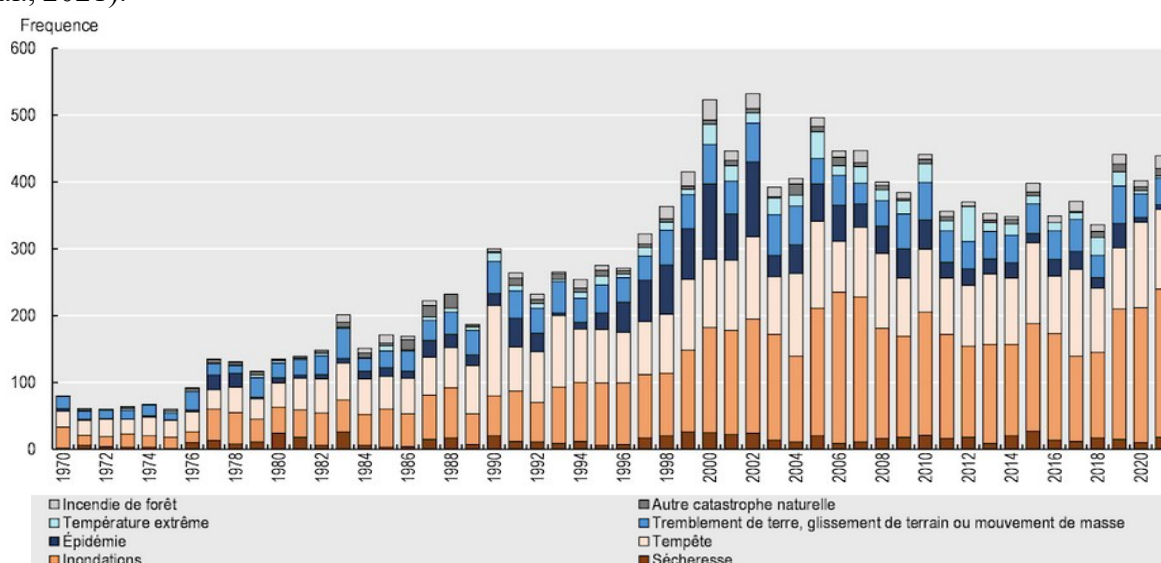


Figure 1 : Fréquence des catastrophes naturelles rapportées dans le monde entre 1970 et 2021. Brás et al., 2021

D'ici 2100, les prévisions quant au réchauffement mondial moyen dépendent du scénario d'émissions considéré (Climat.be, 2024). En effet, une augmentation de température entre 0,3°C et 1,7°C par rapport à 1986-2005 est prévue dans le cas des scénarios les plus optimistes en termes de réduction des émissions. Les scénarios considérant une croissance continue des émissions prévoient quant à eux des augmentations de températures allant de 2,6 à 4,8°C (Climat.be, 2024). Cependant, le changement des températures de surface n'est pas uniforme. Des différences sont observées au niveau des pôles ainsi qu'entre les différents continents (Climat.be, 2024). L'ensemble des scénarios se rejoignent sur le fait que l'Arctique se réchauffera plus rapidement que le reste du globe (Climat.be, 2024) et que les augmentations de températures sont plus importantes au niveau des terres (+1,59°C) qu'au niveau des océans (+0,88°C) (Calvin et al., 2023; GIEC, 2023a).

Ces changements ont des impacts importants sur le cycle de l'eau et la fréquence des événements comme des pluies importantes, des inondations et des périodes de sécheresse risque d'augmenter (GIEC, 2023c; Eea.europa.eu, 2024). En Europe, l'augmentation des températures estivales risque d'être associée à une augmentation des épisodes de sécheresse (GIEC, 2023c; Eea.europa.eu, 2024).

1.1. Impact sur l'agriculture, sur les rendements

Les conséquences des changements climatiques affectent déjà les écosystèmes (FAO, 2021). Les effets sont ressentis au niveau de l'évolution des activités saisonnières, de la qualité et de la quantité d'eau, des mouvements migratoires, des interactions interspécifiques chez de nombreuses espèces terrestres, marines et dulcicoles (FAO, 2021). Sensible aux conditions météorologiques et au climat, l'agriculture est de plus en plus sujette aux conséquences du réchauffement climatique de par sa dépendance aux terres, à l'eau et aux autres ressources impactées par celui-ci (Brás et al., 2021; US EPA, 2022). Les impacts du réchauffement climatique sur l'agriculture dépendent de la gravité, de la vitesse du changement et de la capacité d'adaptation des agriculteurs et des éleveurs (US EPA, 2022).

En plus d'augmenter les risques de maladies et l'apparition d'adventices, les changements de températures et de précipitations peuvent avoir un effet sur les pollinisateurs ainsi que sur le moment de floraison, entraînant un décalage entre les deux qui diminuerait la pollinisation (Walsh et al., 2020). En ce qui concerne la pollution atmosphérique, son augmentation entraîne une diminution de la photosynthèse, une croissance végétative des plantes plus lente et une sensibilité accrue de celles-ci aux maladies (Nolte et al., 2018; US EPA, 2015).

Les impacts des changements climatiques varient fortement en fonction des régions touchées et du type de culture, entraînant une augmentation ou une diminution des rendements selon les cas (GIEC, 2023b; US EPA, 2022). Dans certaines régions, l'évolution des températures, des précipitations ainsi que du nombre de jours sans gel peut conduire à une augmentation de la période de végétation et donc de la période cultivable (USGCRP, 2018). Cette prolongation

peut entraîner des conséquences positives ou négatives sur la production en fonction de la capacité de l'agriculteur à rebondir et planter des cultures à maturation plus longue ou encore d'augmenter son nombre de cycles de culture (GIEC, 2023b). Des effets positifs sont observés en Asie de l'Est ainsi qu'en Europe du Nord pour les cultures de riz et de blé. Dans les régions en hautes latitudes, l'augmentation des températures a permis l'extension des zones de cultures vers les pôles et la réduction du stress dû au froid en Asie de l'Est et en Amérique du Nord (GIEC, 2023b). À contrario, des effets négatifs sont observés dans d'autres régions telles qu'en Afrique subsaharienne, en Amérique du Sud, dans les Caraïbes, en Asie du Sud et en Europe occidentale et méridionale (GIEC, 2023b). En Europe, plus particulièrement, les sécheresses et l'augmentation de la chaleur ont fait tripler les pertes de rendement ces cinq dernières années (GIEC, 2023b). Quant aux rendements moyens mondiaux du blé, du soja et du maïs, ils ont diminué de 11,6%, 12,4% et 9,2% respectivement dû aux effets combinés de la chaleur et de la sécheresse (GIEC, 2023b).

Les stress abiotiques et biotiques sont les principaux défis auxquels les productions végétales mondiales doivent faire face (Kumar et al., 2023). Aujourd'hui, le manque d'eau est l'une des contraintes majeures agissant sur la quantité et la qualité des productions agricoles (Boutraa et al., 2010; Soni et al., 2023). La salinité et la sécheresse sont les deux stress abiotiques les plus menaçants pour la productivité des cultures mondiales (Soni et al., 2023). On prévoit que les épisodes de sécheresses devraient augmenter à l'avenir dû à la diminution des précipitations régionales ainsi qu'à une augmentation de l'évaporation suite au réchauffement de la planète (FAO, 2019; Kumar et al., 2023). Les productions agricoles sont impactées par l'intensification et l'augmentation des sécheresses, tandis que la hausse des températures provoque une augmentation de la demande en eau des cultures (FAO, 2019). Si nous n'agissons pas sur nos modes de consommation actuels, on prévoit qu'en 2050, près des deux tiers de la population mondiale pourraient être confrontés à des pénuries d'eau, tandis que les pertes de récoltes dues au changement climatique continueront d'augmenter (FAO, 2019). Ces dernières années, 75% de la superficie agricole mondiale a déjà subi des pertes de rendement liées à la sécheresse (GIEC, 2023b).

2. Le stress hydrique

Le stress hydrique est l'un des facteurs environnementaux les plus limitants pour la productivité des plantes dans le monde (Soni et al., 2023). Il peut être causé soit par une abondance en eau, soit par une sécheresse. Les plantes ont un besoin journalier en eau très important. En effet, une plante fourragère est, par exemple, constituée d'environ 70 à 85% d'eau et ce volume doit être renouvelé plusieurs fois par jour (Durand, 2007). En cas de sécheresse, la plante ne pourra maintenir sa teneur en eau et la renouveler. En revanche, si le sol est gorgé en eau, les racines n'auront plus accès à l'oxygène pour assurer la respiration cellulaire et seront en condition d'anoxie. Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéresserons principalement à un manque d'eau et le terme « stress hydrique » sera utilisé dans ce sens.

Il est fréquent que les plantes souffrent d'un manque d'eau durant la période estivale, lors de périodes plus sèches (Durand, 2007). Une sécheresse est définie par un déficit d'eau dans le sol ainsi que dans l'atmosphère sur une période plus ou moins courte, qui provoque un déséquilibre hydrologique (Ghannoum, 2009; Kumar et al., 2023). Un stress hydrique apparaît quand l'évaporation et la transpiration de la plante sont supérieures aux précipitations durant une longue période (Kumar et al., 2023).

La croissance et le développement des plantes sont directement impactés par les sécheresses (Kumar et al., 2023; Soni et al., 2023). Les effets dépendent cependant de plusieurs paramètres tels que le niveau du stress hydrique, la durée d'application du stress ainsi que le génotype de l'espèce végétale (Boutraa et al., 2010). Afin d'évaluer la capacité des plantes à résister à un stress hydrique, différents paramètres agricoles peuvent être mesurés, tels que la teneur relative en eau des plantes, mais aussi des mesures de paramètres de croissance comme le nombre de feuilles, d'inflorescences, de nœuds ou encore la taille finale. (Boutraa et al., 2010). En termes de rendement, un stress hydrique peut entraîner des pertes allant de 40% à 85% dépendant notamment de l'environnement, de la durée, de la fréquence et de la période de croissance auquel a lieu la sécheresse (Nat. Plants, 2024). Aujourd'hui, les sécheresses touchent plus de 10% des terres arabes, entraînant une désertification de certaines zones arides et semi-arides (Soni et al., 2023).

2.1. Impacts du stress hydrique sur la physiologie et la croissance des plantes

Le besoin élevé en eau des plantes est lié à leur mécanisme de transpiration, permettant les mouvements de l'eau dans celles-ci (Durand, 2007). La transpiration d'une feuille est proportionnelle à la différence en eau entre la feuille et l'atmosphère. En cas de rayonnement direct sur la feuille, la température de celle-ci va augmenter ainsi que la teneur en eau de l'air contenu dans les feuilles, la plante va alors transpirer (Durand, 2007). La transpiration des feuilles entraîne une chute de pression au sein de leurs cellules, attirant vers le haut de la plante l'eau qui circule dans les vaisseaux ainsi que dans le système racinaire. Le potentiel de l'eau contenue dans le sol dépend principalement de la teneur en eau et de l'arrangement des particules du sol. Lorsque la plante est soumise à un stress hydrique, différents mécanismes de régulation sont mis en place par la plante. Ceux-ci sont soit progressifs, par adaptation des surfaces d'échange, soit rapides, par la modification de ses capacités d'échange d'eau (Durand, 2007).

L'un des premiers mécanismes de défense mis en place rapidement par la plante en cas de stress hydrique est la fermeture de ses stomates pour limiter la transpiration et, par conséquent, la perte d'eau. La fermeture des stomates aura aussi comme impact la diminution de l'assimilation de carbone et d'autres facteurs nécessaires à la photosynthèse (Durand, 2007; Soni et al., 2023). S'en suivra une diminution de la photosynthèse et de la production de sucres (Durand, 2007), ce qui diminuera la croissance de la plante. Des métabolites tels que l'acide abscissique (ABA)

sont produits par les racines et sont responsables de la fermeture des stomates lorsqu'une zone sèche dans le sol est ressentie par les racines (Durand, 2007).

D'autres mécanismes de régulation plus progressifs sont observables en cas de stress hydrique, tels que la sénescence accélérée du feuillage ou encore la modification de la géométrie des feuilles. En effet, la plante peut adapter ses surfaces foliaires grâce notamment à l'enroulement de ses feuilles ou à la modification de leurs angles d'inclinaison. De plus, en cas de sécheresse, la tension de l'eau du sol est supérieure à celle supportée par la plante, ce qui provoque un flétrissement de la plante (Durand, 2007). Finalement, des feuilles jaunies, présentant des marques de brûlure ou sénescences sont aussi des symptômes d'un manque d'eau pour la plante. L'intensité de ces symptômes dépend fortement de la fréquence et de l'intensité du stress ainsi que de la présence d'autres stress (Soni et al., 2023).

Durant la photosynthèse, la photorespiration et la respiration cellulaire, une plante soumise à un stress hydrique produit des ROS, des espèces réactives de l'oxygène, qui sont toxiques pour les cellules végétales. Les ROS se combinent avec des molécules telles que les lipides, les protéines et les acides nucléiques. Cela provoque alors la dénaturation des protéines, la peroxydation des lipides et la mutation de l'ADN (Boutraa et al., 2010). Des effets négatifs sur les mitochondries et les chloroplastes des cellules végétales sont aussi observés en cas de sécheresse, entraînant une fuite du contenu cellulaire hors de la cellule (Boutraa et al., 2010). La photosynthèse est réduite suite à la fermeture des stomates (Durand, 2007).

La phase de germination de la graine est le stade de la croissance des plantes le plus sensible au stress hydrique (Durand, 2007; Soni et al., 2023). Un déficit hydrique retarde le début de la germination, car le processus d'initiation de la germination nécessite une grande humidité du sol (Soni et al., 2023). Le potentiel hydrique du sol a un impact linéaire sur la germination des graines (Soni et al., 2023).

Durant la phase de croissance végétative, de nombreuses études ont démontré que le stress hydrique entraîne une réduction de la croissance générale de la plante. Ces réductions s'observent notamment au niveau de sa taille, de sa surface foliaire, des poids frais et secs des différents organes tels que les tiges, les feuilles et les racines (Boutraa et al., 2010; Soni et al., 2023). L'impact du stress hydrique sur la surface foliaire résulte de méthodes d'adaptation de la plante au manque d'eau afin de limiter son taux de transpiration et de maintenir une réserve d'eau disponible suffisante au niveau de ses racines (Boutraa et al., 2010). Les feuilles et les tiges de la plante qui subissent un stress hydrique voient leur taux de croissance diminuer, car le flux d'eau du xylème vers les cellules environnantes est interrompu (Soni et al., 2023). Ces changements provoquent aussi une diminution de l'élongation des cellules qui peut mener à une inhibition de leur croissance (Soni et al., 2023).

Cependant, une réduction de croissance n'est pas toujours observée en réponse au stress hydrique et, de manière générale, les racines sont les organes les moins sensibles à la sécheresse

(Durand, 2007). La croissance racinaire est même parfois favorisée afin de permettre à la plante de puiser l'eau plus en profondeur. En fonction des espèces, le poids sec des racines de certains cultivars n'est parfois pas ou peu affecté par le stress hydrique. L'augmentation de la croissance des racines est par conséquent un bon indicateur de la résistance des plantes au stress hydrique et donc un bon moyen de sélectionner un cultivar tolérant à la sécheresse (Boutraa et al., 2010).

Le transport des nutriments des racines vers les parties aériennes de la plante est aussi impacté par le stress hydrique dû à une plus faible absorption de l'eau par les plantes soumises au stress. Une sécheresse a donc un impact sur les relations nutritives des plantes (Soni et al., 2023). Certains nutriments essentiels, comme l'azote, le silicium, le magnésium et le calcium sont, en temps normal, absorbés par les racines simultanément avec l'eau. Une condition de sécheresse limitera alors ce mouvement et par conséquent l'absorption de nutriments (Soni et al., 2023). Le stress hydrique a comme autre impact la diminution de la minéralisation de l'azote du sol, provoquant une diminution de la disponibilité de celui-ci (Soni et al., 2023). De manière générale, une sécheresse réduit fortement l'absorption des minéraux et perturbe l'équilibre en nutriments, ce qui impacte les processus de croissance et de développement de la plante (Soni et al., 2023).

Au niveau reproducteur, selon le moment d'application, le stress hydrique peut affecter le temps de floraison, induire un avortement des fleurs, entraîner une baisse de fertilité suite à un développement anormal des anthères, du pollen ou des ovules, réduire ou inhiber la fécondation, et réduire le remplissage des grains (Sinha et al., 2021). La phase reproductive est souvent considérée comme plus sensible aux stress que la phase végétative (Cawoy et al., 2019). Le développement des fleurs et la fécondation sont deux processus essentiels à la production de rendement chez les cultures consommées pour leurs graines et leurs fruits, et sont particulièrement vulnérables aux stress abiotiques tels que le déficit hydrique (Sinha et al., 2021). Par ce biais, le stress hydrique affectera donc les paramètres de rendement. En plus d'affecter le rendement, le stress hydrique peut aussi affecter la qualité nutritionnelle des graines et des parties récoltées. Chez les céréales, le stress hydrique va affecter la teneur en minéraux des graines ainsi que leur teneur en protéines (Havrlentová et al., 2021). Chez les plantes fourragères, les teneurs en sucres solubles, en sucres structuraux et en protéines des organes récoltés peuvent être affectées par le stress hydrique, ce qui impactera directement la valeur alimentaire des fourrages (Durand, 2007).

3. Le sarrasin de Tartarie

3.1. Culture du sarrasin

Le sarrasin, de son nom latin *Fagopyrum sp.*, appartient à la famille des Polygonaceae (Chrungoo et al., 2011) et est considéré comme une pseudo-céréale, comme notamment l'amarante et le quinoa (Schilperoord, 2017). Les pseudo-céréales sont des espèces dicotylédones dont les grains (botaniquement parlant, les fruits) sont comestibles. Ce nom vient de l'apparence physique des grains et de leur teneur élevée en amidon, similaire à celle des « vraies » céréales (Martínez-Villaluenga et al., 2020). Les « vraies » céréales sont des espèces monocotylédones de la famille des Poacées (Martínez-Villaluenga et al., 2020). Les pseudo-céréales sont des cultures prometteuses car elles ont l'avantage d'avoir une grande variabilité climatique qui leur permet de s'adapter à différents environnements, tant à des conditions climatiques tempérées qu'à des conditions tropicales (Martínez-Villaluenga et al., 2020).

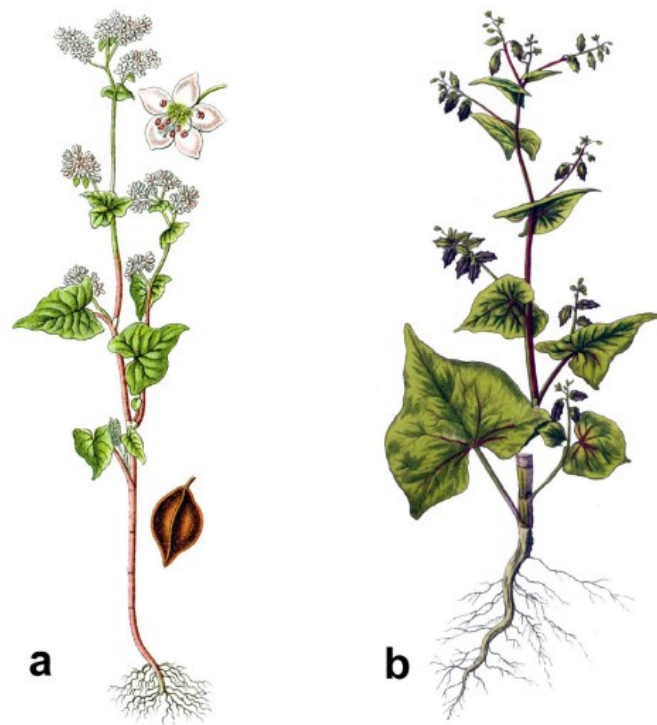


Figure 2 : Illustration de deux espèces de sarrasin : (a) *Fagopyrum esculentum* et (b) *Fagopyrum tataricum*. (Small, 2017)

Le genre *Fagopyrum* est composé d'environ 26 espèces mais le nombre exact d'espèces reste incertain (Chrungoo et al., 2011; Dar et al., 2021; Small, 2017). Parmi celles-ci, seulement 2 espèces sont cultivées (Figure 2), le sarrasin commun (*Fagopyrum esculentum*) et le sarrasin de Tartarie (*Fagopyrum tataricum*) (Chrungoo et al., 2011; Small, 2017). Cependant, le sarrasin commun représente à lui seul 90% du sarrasin cultivé (Aubert and Quinet, 2022). Le sarrasin est cultivé pour son potentiel dans l'alimentation humaine, dans la médecine ainsi qu'en tant que culture fourragère (Chrungoo et al., 2011).

La production mondiale de sarrasin en 2022 fut de 2,23 millions de tonnes, ce qui représente une production relativement faible en comparaison au maïs, au blé et au riz avec des production de 1,16 milliard de tonnes, 808,44 millions de tonnes et 776,46 millions de tonnes respectivement durant la même année (Faostat, 2024).

Jusqu'en 1993, l'Asie était le plus grand producteur de sarrasin dans le monde. Aujourd'hui, le sarrasin est principalement cultivé en Europe, suivi de l'Asie, qui reste cependant le deuxième producteur mondial de sarrasin (Figure 3 ; Faostat, 2024). En 2022, les cinq principaux pays producteurs de sarrasin étaient la Russie, avec une production de 1,22 million de tonnes, suivie de la Chine, de l'Ukraine, du Kazakhstan et des Etats-Unis (Faostat, 2024).

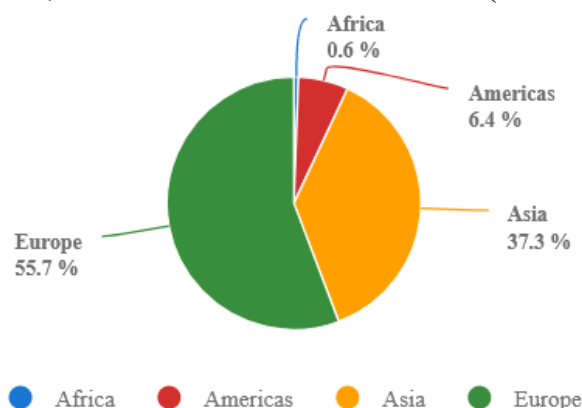


Figure 3 : Distribution de la production mondiale de sarrasin entre 2000 et 2022. (FAOSTAT 2024)

Jadis, le sarrasin était cultivé à plus grande échelle mais il a connu une diminution importante de sa production depuis les années 1990 (Figure 4; Faostat, 2024). Cette diminution d'intérêt envers cette culture peut notamment s'expliquer par l'utilisation croissante d'engrais synthétiques à base d'azote qui ont fait disparaître l'avantage du sarrasin comme culture céréalière, à savoir sa capacité à pousser sur des sols pauvres (Small, 2017). Ainsi, les cultures à meilleurs rendements telles que le maïs, le blé et autres céréales ont considérablement augmenté au détriment du sarrasin qui est aujourd'hui principalement consommé en Asie et à l'Est de l'Europe (Small, 2017). Depuis quelques années, la culture du sarrasin regagne en intérêt, notamment en Europe, pour ses qualités nutritionnelles et sa bonne adaptation à l'agriculture biologique.

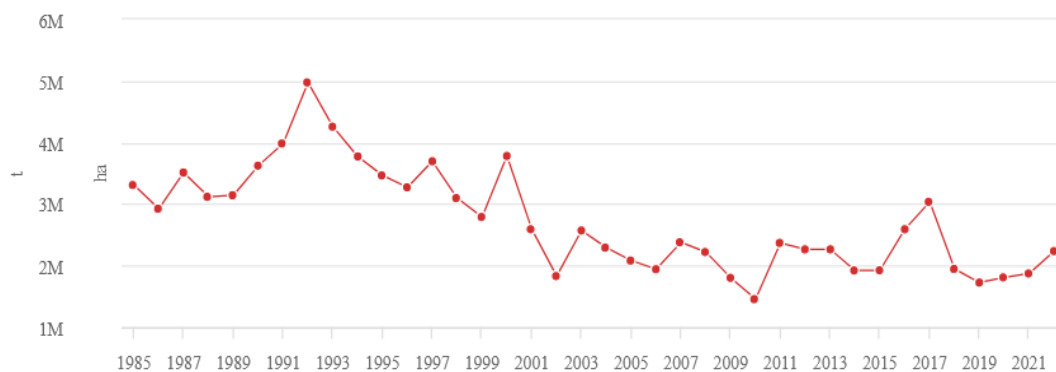


Figure 4 : Evolution de la production mondiale de sarrasin de 1985 à 2022. (FAOSTAT, 2024)

3.2. Origine et culture du sarrasin de Tartarie

Le sarrasin de Tartarie est originaire de la région montagneuse de l'Himalaya. Il est cultivé principalement en Asie centrale ainsi qu'au Nord, au centre et à l'Est de l'Europe (Kreft et al., 2023). La « Tartarie », d'où le sarrasin de Tartarie tient son nom, est une région qui s'étend du Japon au fleuve Dniepr, jusqu'au nord de la mer Noire (Small, 2017). On retrouve le sarrasin de Tartarie à l'état sauvage en Chine ainsi qu'en Sibérie, une partie de l'air géographique de la Tartarie (Small, 2017). Les graines de sarrasin de Tartarie, comparées aux graines de sarrasin commun, ont la particularité de présenter une certaine tolérance au gel (Hunt et al., 2017). En effet, elles sont protégées par une enveloppe épaisse ainsi que par des substances phénoliques qui leurs permettent de rester vivantes, en dormance, dans le sol pendant plusieurs années (Kreft et al., 2023). Lorsque les conditions environnementales sont appropriées, les graines vont germer. Le sarrasin de Tartarie est capable de survivre aux fortes radiations UV qui ont lieu notamment à haute altitude (Kreft et al., 2023). On retrouve donc des cultures de sarrasin de Tartarie à proximité de l'Himalaya tel qu'en Chine, Népal, Bhoutan, Inde mais également en Corée, Japon, Kazakhstan, Russie, Ukraine, Suède, Pologne, Italie, Luxembourg et Slovénie (Kreft et al., 2023).

3.3. Description morphologique

Le sarrasin est une dicotylédone herbacée annuelle (Schilperoord, 2017; Small, 2017; Zhou et al., 2018a). Sa période de végétation dure entre 100 et 140 jours avec une durée de floraison d'environ 6 semaines (Schilperoord, 2017). Le sarrasin commun et le sarrasin de Tartarie ont plusieurs ressemblances morphologiques mais diffèrent notamment au niveau de la morphologie des fleurs et de leur mode de reproduction. Leurs similarités et différences sont présentées dans les paragraphes suivants.

Le système racinaire des deux espèces de sarrasin consiste en une racine principale pivotante sur laquelle se développent de nombreuses racines latérales fines et fibreuses (Small, 2017). Au niveau aérien, le sarrasin commun (*F. esculentum*) peut atteindre une hauteur de 80 à 140 cm (Schilperoord, 2017; Small, 2017; Zhou et al., 2018a). Les tiges dressées sont creuses et varient d'une couleur verte à une couleur brune-rougeâtre selon l'état de maturité (Kreft, 2022 ; Small, 2017; Zhou et al., 2018a). Le sarrasin de Tartarie partage ce même type de morphologie à la différence qu'il développe une tige plus élancée et plus ramifiée (Aubert et al., 2021a; Small, 2017; Zhou et al., 2018a).

Au niveau de feuilles, le sarrasin commun développe un pétiole de 1,5 à 5 cm (Zhou et al., 2018b) à la différence du sarrasin de Tartarie dont les pétioles ont une taille proche de la taille de leur limbe (Zhou et al., 2018a). Les deux espèces développent des limbes de forme triangulaire, avec deux surfaces papillonnées le long des nervures et une base cordée ou

tronquée. L'apex des feuilles du sarrasin commun est acuminé tandis que celui du sarrasin de Tartarie est aigu (Zhou et al., 2018a, 2018b).

Les inflorescences de sarrasin apparaissent à l'aisselle des feuilles et la taille des feuilles axillantes (bractées) des inflorescences diminue de telle sorte que les dernières inflorescences sont organisées en « bouquet terminal » (Quinet et al., 2004). Les inflorescences du sarrasin commun sont des racèmes de cymes portées par un pédoncule de 2 à 4 cm (Quinet et al., 2004; Zhou et al., 2018b). Le nombre de fleurs par inflorescence est de l'ordre de 75-100 chez le sarrasin commun tandis qu'il est de l'ordre de 30 chez le sarrasin de Tartarie (Aubert et al., 2021a). Les fleurs de sarrasin commun sont habituellement de couleur blanche, mais peuvent être parfois de couleur rose ou verte (Small, 2017). Le périanthe des fleurs est composé de 5 tépales elliptiques. Celui-ci entoure généralement huit anthères rosâtres ainsi qu'un pistil composé d'un ovaire surmonté par trois styles et stigmates et huit nectaires (Wu et al., 2017; Zhou et al., 2018b). Les fleurs du sarrasin de Tartarie sont généralement plus petites et ont des tépales plus verdâtre (Figure 5C; Zhou et al., 2018a). Les fleurs du sarrasin commun sont hétérostyles et auto-incompatibles (Quinet et al., 2004). En effet, la moitié des plantes ont des fleurs brévistyles avec des pistils plus courts que les étamines, tandis que l'autre moitié ont des fleurs longistyles avec des pistils plus longs que les étamines. Généralement, la proportion des deux morphes est de 1 : 1 pour une même population (Small, 2017; Zhou et al., 2018b, 2018a). Au contraire du sarrasin commun, les fleurs du sarrasin de Tartarie sont homostyles, avec des étamines et un pistil de même taille, et auto-compatibles (Kreft, 2022 ; Wu et al., 2017). Cette différence fait que le sarrasin commun est allogame et doit être pollinisé par les insectes pour la formation des graines tandis que le sarrasin de Tartarie est autogame et peut s'autoféconder (Aubert et al., 2021b; Wu et al., 2017; Zhou et al., 2018b). Le sarrasin de Tartarie est généralement cléistogame, sa pollinisation a lieu avant la floraison et ne dépend donc pas des pollinisateurs (Aubert et al., 2021b; Wu et al., 2017; Zhou et al., 2018a)

Les fruits du sarrasin sont des akènes et ont une forme qui s'apparente à un tétraèdre, de couleur brune ou noire et mesurent de 5 à 8 mm de long (Small, 2017). Les akènes du sarrasin de Tartarie sont généralement moins gros (Figure 5D). Les fruits du sarrasin sont communément appelés « graines » comme les fruits des céréales. La structure de la graine de sarrasin est relativement similaire à celle des céréales mais présente néanmoins certaines différences (Zhu, 2016a). En effet, les deux graines sont composées d'un endosperme amylicé ainsi que d'une couche d'aleurone¹ non amylicée (Zhu, 2016a). Le grain de sarrasin est composé d'un embryon central entouré de l'endosperme et possède deux cotylédons (Zhu, 2016a). La graine est enveloppée

¹ Aleurone : Protéine végétale de réserve présente sous forme de grains dans l'albumen de nombreuses graines. (Wikipédia)

d'une coque épaisse qui protège un gruau comestible (Small, 2017). Les graines du sarrasin de Tartarie sont environ 40% plus petites que celles du sarrasin commun (Small, 2017)

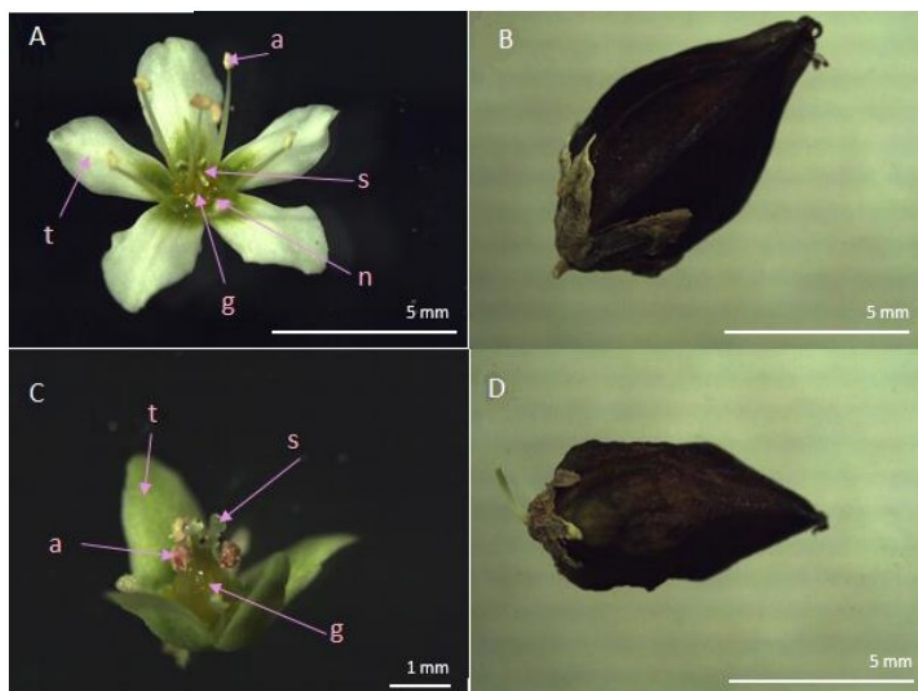


Figure 5 : Illustrations de la fleur et de la graine du sarrasin commun et du sarrasin de Tartarie : (A) : Fleur de *F. esculentum*, (B) : graine de *F. esculentum*, (C) : fleur de *F. tataricum*, (D) : graine de *F. tataricum*, t : tépale, a : anthère, s : stigmate, g : gynécée, n : nectaire. (Photos issues du mémoire de Lauranne Aubert, 2018)

3.4. Exigences écologiques

Le sarrasin est adapté à l'agriculture biologique car il est peu exigeant en intrants, il pousse vite et il est résistant aux maladies (Cawoy et al., 2007; Jacquemart et al., 2012). Le sarrasin est d'ailleurs appelé « culture de 100 jours » car il peut réaliser son cycle de vie en moins de 3 mois (Jacquemart et al., 2012). Le sarrasin est une culture qui nécessite peu d'entretien, il convient aussi bien comme culture principale que comme deuxième culture, ou encore comme engrais vert (Schilperoord, 2017). En effet, en plus de sa germination et de sa croissance rapide ainsi que de sa biomasse aérienne importante, le sarrasin est une culture peu affectée par la concurrence avec les adventices et permet notamment de les réduire fortement (Jacquemart et al., 2012; Wirth, 2017). Les plantes de sarrasin peuvent être affectées par de nombreux virus mais les dégâts occasionnés par ceux-ci sur le sarrasin restent généralement limités et ne nécessitent pas de traitement pesticide (Jacquemart et al., 2012).

Les plants de sarrasin peuvent être utilisés comme facilitateurs allélopathiques, supprimant jusqu'à 95% des adventices grâce aux substances telles que le diéthylphthalate, l'acide gallique et la catéchine (Jacquemart et al., 2012; Wirth, 2017). De nombreuses études montrent aussi une corrélation entre la biomasse produite et la suppression des adventices, due à la réduction

de la lumière solaire disponible par la biomasse aérienne importante du couvert végétal (Wirth, 2017).

Les plants de sarrasin présentent aussi des avantages tant qu'engrais vert lorsqu'ils sont incorporés dans le sol et offrent une protection de ceux-ci contre les agents pathogènes (Jacquemart et al., 2012). En plus de participer à la lutte contre les ravageurs, le sarrasin présente de nombreux autres avantages comme engrais vert : une croissance et une biomasse élevée, une teneur en éléments nutritifs importante et notamment en azote, une forte mobilisation du phosphore, un taux de décomposition élevé et une bonne qualité de litière (Jacquemart et al., 2012).

Grâce à sa production de pollen et de nectar durant la floraison, le sarrasin attire aussi de nombreux pollinisateurs et notamment des prédateurs de ravageurs. Il peut donc aussi être utilisé sur des zones de cultures intensives pour augmenter la pollinisation (Jacquemart et al., 2012).

Le sarrasin est une culture de printemps. En effet, une température du sol supérieure à 8°C est nécessaire pour la germination des graines et une période de gel peut être néfaste pour son rendement (Schilperoord, 2017). Le sarrasin de Tartarie est cependant plus résistant au froid que le sarrasin commun et est connu de manière générale pour être cultivé dans des conditions climatiques plus difficiles (Bonafaccia et al., 2003), en zones pierreuses, à haute altitude et sous fort rayonnement solaire (Kreft, 2022). Les graines dormantes du sarrasin de Tartarie sont recouvertes d'une enveloppe robuste, leur permettant de survivre dans le sol durant plusieurs mois en attendant des conditions plus favorables (Kreft, 2022).

Au niveau nutritif, le sarrasin est peu exigeant. Des sols légèrement alcalins, sableux à sableux-argileux sont idéaux pour sa culture (Schilperoord, 2017). Le sarrasin se cultive sans difficulté dans un sol peu profond et pauvre en éléments nutritifs, contrairement aux sols très riches dans lesquels il développe une sensibilité à la verse (Small, 2017).

4. Intérêt et utilisation du sarrasin de Tartarie

4.1. Qualité nutritionnelle

Longtemps mis de côté au profit des céréales, le sarrasin retrouve un regain d'intérêt ces dernières années pour ces nombreuses qualités nutritionnelles (Zhu, 2016a).

L'utilisation du sarrasin est relativement similaire aux céréales tel que le blé mais aussi au riz. Les graines de sarrasin décortiquées sont utilisées pour fabriquer de la farine qui permettra de produire une large variété de produits alimentaires tel que des préparations pour crêpes, du pain, des nouilles, des biscuits, des céréales pour petit-déjeuner et bien d'autres (Small, 2017). Pour les personnes végétariennes et autres personnes qui ne consomment pas de protéines d'origine animale, les produits à base de sarrasin peuvent constituer une source de protéine intéressante et de très bonne qualité (Kreft et al., 2023). Du thé de sarrasin peut aussi être produit lorsque

les graines sont trempées, cuites à la vapeur pour finalement être séchées (Zhu, 2016a). Les grains de sarrasin peuvent aussi être consommés sous forme de graines décortiquées, connues sous le nom de « kasha » (Kreft et al., 2023). Les jeunes pousses de sarrasin peuvent aussi être consommées comme graines germées ou en salade. Des bières sont également produites à base de sarrasin (Kreft et al., 2023).

Le sarrasin de Tartarie est aussi connu sous le nom de « sarrasin amer » en raison de la forte amertume de la farine qu'il produit (Suzuki et al., 2014). Ce goût amer est d'ailleurs l'une des principales raisons pour lesquelles le sarrasin de Tartarie est moins utilisé que le sarrasin commun à ce jour (Zhu, 2016a). Cependant, des recherches sur le développement de nouveaux cultivars ayant peu ou pas de goût amer et des méthodes pour cacher l'amertume sont actuellement en cours (Zhu, 2016a).

La couleur de la farine produite par les deux espèces varie aussi en fonction de l'espèce. La farine de sarrasin commun est plus blanche que celle du sarrasin de Tartarie qui est de couleur plus jaune. Cela est dû à une concentration plus faible en flavonoïdes, notamment en rutine, pour ce premier (Zhu, 2016a).

Le sarrasin de Tartarie est très intéressant d'un point de vue apport nutritif. En effet, il contient des protéines de hautes valeurs biologiques, une composition bonne et équilibrée en acides gras et acides aminés, des teneurs élevées en vitamines B1, B2 et B6, un contenu élevé en fibres brutes ainsi qu'une teneur en antioxydants, particulièrement en flavonoïdes, plus élevée que le sarrasin commun (Fabjan et al., 2003; Kreft et al., 2023). Cette composition rend le sarrasin de Tartarie très intéressant en termes de valeurs nutritionnelles par rapport au sarrasin commun ainsi qu'aux autres céréales.

Un autre avantage de la consommation de sarrasin est sa particularité d'être une variété de grain entier sans gluten ce qui le rend intéressant pour les personnes souffrant de la maladie cœliaque lié à la consommation de gluten (Alvarez-Jubete et al., 2010).

4.2. Intérêt nutraceutique

La grande qualité nutritionnelle du sarrasin présente de nombreux bénéfices pour la santé (Kreft et al., 2023). Le sarrasin de Tartarie constitue une excellente source d'acides aminés essentiels, de fibres alimentaires, de minéraux, de vitamines et de nombreux autres composants bioactifs (Zhu, 2016a). Grâce à son contenu en protéines et en amidon lentement digérés ainsi qu'aux substances phénoliques, la consommation en sarrasin de Tartarie prévient et agit sur la formation de calculs biliaires, l'hypertension, le diabète, les problèmes cardio-vasculaires, et l'obésité (Kreft et al., 2023; Zhu, 2016a).

Le sarrasin de Tartarie est aussi une source alimentaire précieuse en flavonoïdes et en autres composés phénoliques, avec sa composition élevée en rutine, en quercétine et en quercitrine

(Fabjan et al., 2003; Kreft et al., 2023; Ruan et al., 2022). Ces flavonoïdes ont de nombreux bénéfices sur la santé humaines (Fabjan et al., 2003). Les polyphénols sont, de manière générale, d'importants antioxydants alimentaires. Ils ont une action anti-inflammatoire réduisant les effets des accidents cérébrovasculaires et jouant un rôle à des niveaux neurologiques tel que la dépression, l'anxiété et la maladie d'Alzheimer (Kreft et al., 2023).

L'activité antioxydante du sarrasin est positivement corrélée à son taux de flavonoïdes ; le sarrasin de Tartarie étant plus concentré en flavonoïdes (Ruan et al., 2022), il présente par conséquent des activités antioxydantes plus élevées que le sarrasin commun (Zhu, 2016a)..

Les bienfaits de la rutine sont, en autres, la réduction de l'hypertension artérielle, la diminution de la perméabilité des vaisseaux, un effet anti-œdème, la réduction du risque d'artériosclérose et une activité antioxydante (Fabjan et al., 2003; Patel and Patel, 2019; Zhu, 2016a).

La quercétine est un flavonoïde qui agit sur de nombreuses propriétés biologiques notamment sur la régulation du microbiote intestinal (Kreft et al., 2023). D'autres bioactivités ont été aussi découvertes dans les vaisseaux sanguins, les muscles ainsi que le cerveau (Kreft et al., 2023). Les composés phénoliques purs retrouvés dans le sarrasin tel que la quercétine, l'isoquercétine et la rutine présentent aussi une activité antibactérienne (Zhu, 2016a). Parmi ces composés, la quercétine possède l'activité antimicrobienne la plus élevée grâce à sa capacité d'inhiber la synthèse d'ADN et d'ARN et de perturber l'activité de la membrane cellulaire des cellules bactériennes (Zhu, 2016a).

D'après Zhu (2016), la consommation d'une importante quantité de sarrasin n'a aucun effet secondaire (Zhu, 2016a). Néanmoins, la consommation du sarrasin n'est pas sans risque pour autant. En effet, le sarrasin peut provoquer des allergies à médiation IgE, ce qui le classe parmi les aliments à risque de réaction allergique grave et d'anaphylaxie. Cependant, l'incidence de ce risque reste relativement faible car il est estimé à 0,1 – 0,01 cas pour 100 000 personnes par année (Dinardo et al., 2024; Ruan et al., 2022).

5. Composition nutritionnelle du sarrasin de Tartarie

Le tableau ci-dessous (Tableau 1) présente les différents composants des graines de sarrasin en mettant l'accent sur les différences entre le sarrasin de Tartarie et le sarrasin commun.

Tableau 1 : Comparaison du contenu nutritionnel entre le sarrasin de Tartarie et le sarrasin commun pour 100 g de sarrasin.

	Sarrasin de Tartarie	Sarrasin commun
Valeur énergétique [kJ]	1276.80	1354.0
Lipides [g]	2.70	2.30
Protéines [g]	9.70	9.30
Glucides [g]	60.20	66.50
Fibres alimentaires [g]	5.80	6.50
Calcium [mg]	39.0	47.0
Magnésium [mg]	94.0	258.0
Fer [mg]	4.40	6.20
Manganèse [mg]	1.31	2.04
Zinc [mg]	2.02	3.62
Cuivre [mg]	0.89	0.56
Potassium [mg]	320.0	401.0
Sodium [mg]	2.30	4.70
Phosphore [mg]	244.0	297.0
Sélénium [µg]	5.57	2.45
Vitamine C [mg]	0	0
Vitamine E [mg]	1.73	4.40
Vitamine A [µg]	0	3.0
Cholestérol [mg]	0	0
Carotène [µg]	2.30	2.40
Riboflavine [mg]	0.21	0.16
Niacine [mg]	1.50	2.20
Thiamine [mg]	0.32	0.28

Source ; (Ruan et al., 2022)

En termes de protéines, de lipides, de glucides et de fibres alimentaires, les deux espèces de sarrasin ont des teneurs relativement similaires (Ruan et al., 2022; Zhu, 2016a). La teneur en protéines du sarrasin de Tartarie est comprise entre 8% et 19% avec des acides aminés en concentrations équilibrées et biodisponibles. Les principales protéines du sarrasin de Tartarie sont l'albumine, la globuline et la gliadine avec des teneurs respectives de 51,42%, 13,69% et 8,83% (Ruan et al., 2022).

Le sarrasin contient aussi beaucoup d'amidon résistant qui est classé comme une sorte de fibre alimentaire (Ruan et al., 2022; Zhu, 2016a). La particularité de l'amidon résistant est de ne pas être absorbé par l'intestin grêle mais d'être partiellement fermenté dans le gros intestin. Sa fonction est proche de celle des fibres alimentaires, présentes elles aussi en quantité importante dans le sarrasin de Tartarie. L'amidon représente près de 70% du poids sec total des graines de Tartarie, ce qui en fait le principal composant des graines (Jha et al., 2024; Zhu, 2016a). Le contenu en fibres alimentaires dans le son de sarrasin de Tartarie est d'environ 40%, dont 25% de fibres alimentaires solubles (Jha et al., 2024; Ruan et al., 2022). Le sarrasin est riche en douze acides aminés tels que la lysine, arginine, la cystéine et la méthionine (Jha et al., 2024).

La composition en acide gras est assez similaire entre le sarrasin commun et le sarrasin de Tartarie avec une teneur moyenne qui varie entre 1 et 5% (Qin et al., 2010). Les acides gras insaturés représentent environ 79% des acides gras totaux du sarrasin de Tartarie. Les principaux sont l'acide linoléique (C18 :2) et l'acide oléique (C18 :1). L'acide linoléique est l'acide gras le plus important du corps humain, ne pouvant pas être synthétisé par celui-ci. L'acide linoléique peut atteindre une teneur de 36,6% dans le sarrasin de Tartarie (Ruan et al., 2022).

La teneur moyenne en polyphénols totaux contenus dans le sarrasin commun est de 40,07% contre 107,24% dans le sarrasin de Tartarie (Ruan et al., 2022). Parmi les polyphénols majeurs retrouvés dans les graines de sarrasin de Tartarie, on distingue les anthraquinones, les acides phénoliques et les flavonoïdes (Zhu, 2016a). Les teneurs en flavonoïdes dans le sarrasin de Tartarie sont largement plus importantes que celles du sarrasin commun (Ruan et al., 2022; Zhu, 2016a). On observe cependant une grande variation des concentrations en flavonoïdes selon la variété de sarrasin de Tartarie (Qin et al., 2010). La rutine est le flavonoïde majeur du sarrasin (Patel and Patel, 2019), elle représente 70%-90% des flavonoïdes (Ruan et al., 2022) et est retrouvée en plus grande concentration dans le sarrasin de Tartarie que dans le sarrasin commun. Ce composé peut atteindre une concentration de 81 mg/g dans le grain de sarrasin de Tartarie contre 0,2 mg/g dans celui du sarrasin commun (Zhu, 2016a)

Dans la composition du sarrasin de Tartarie, on retrouve diverses vitamines tel que les vitamines B (B1, B2 et B6), C, E et P (Ruan et al., 2022; Zhu, 2016a). Les grains de sarrasin de Tartarie ont une teneur en vitamine B d'environ 0,78 mg/ 100g. La teneur moyenne en vitamine E, une vitamine liposoluble, varie entre 2,0 et 45,8 mg/ kg, avec une teneur moyenne de 9,5 mg/kg

(Ruan et al., 2022). Des changements de composition et de concentration des vitamines C et E ont été étudiés lors de la germination de sarrasin de Tartarie (Zhou et al., 2015). En effet lors de la phase de germination, la teneur en vitamines E a tendance à diminuer contrairement à celle des vitamines C et B1 qui augmentent (Zhou et al., 2015; Zhu, 2016a).

En ce qui concerne la concentration en minéraux mesurée dans le sarrasin de Tartarie, les teneurs varient entre les différentes parties de la graine, dû à une différence de fluidité entre les tissus vasculaires (Ruan et al., 2022). La concentration en minéraux est la plus élevée dans le son. Le fer, le zinc, le manganèse, le cuivre, le lithium, le molybdène et l'aluminium sont concentrés principalement dans l'enveloppe de la graine (Ruan et al., 2022). Les minéraux contenus en concentration les plus importantes dans le sarrasin sont, dans l'ordre décroissant, le potassium, le phosphore et le magnésium (Tableau 1). Le sarrasin de Tartarie est aussi une source de sélénium pour l'alimentation humaine, un minéral qui est généralement absent dans les grains des autres céréales (Kreft, 2022 ; Ruan et al., 2022).

6. Résistance au stress hydrique chez le sarrasin

Une étude réalisée par Aubert et al. (2021) a comparé la résistance au stress hydrique entre le sarrasin commun et le sarrasin de Tartarie et a montré que le sarrasin commun était plus affecté par le stress hydrique que le sarrasin de Tartarie et que les deux espèces différaient par leur stratégie de résistance. Si la croissance végétative était affectée chez le sarrasin commun, ce n'était pas le cas chez le sarrasin de Tartarie. Par contre, la phase reproductrice était affectée chez les deux espèces bien que plus fortement chez le sarrasin commun. Le stress hydrique a diminué le nombre d'inflorescences par plante chez le sarrasin de Tartarie mais n'a pas affecté le taux de mise à graines. La production d'antioxydants a aussi augmenté chez le sarrasin de Tartarie en réponse au stress hydrique (Aubert et al., 2021b). Suite à leurs observations, les auteurs ont suggéré que le sarrasin de Tartarie présentait plutôt des mécanismes de tolérance au stress hydrique tandis que le sarrasin commun présentait plutôt des mécanismes d'évitement (Aubert et al., 2021b). Cette étude ne comparait cependant qu'une variété de chaque espèce. Dans une étude comparant la résistance au stress hydrique de plusieurs variétés de sarrasin de Tartarie, Aubert et al. (2022) ont montré que les plantes étaient plus discriminées par les conditions environnementales que par leur génotype, suggérant peu de différences entre variétés face au stress hydrique. Dans cette étude, le stress hydrique diminuait la hauteur des plantes ainsi que la surface foliaire et la production de graines à l'échelle de la plante entière (Aubert et al., 2022). L'impact du stress hydrique chez le sarrasin de Tartarie dépend de l'intensité du stress. En effet, He et al. (2024), ont montré qu'un faible stress hydrique durant la floraison du sarrasin de Tartarie peut améliorer le rendement du sarrasin en régulant le métabolisme du carbone et de l'azote.

III. Matériels et méthodes

1. Matériel végétal et conditions de culture

Cette étude a porté sur la variété Zlata du sarrasin de Tartarie (*Fagopyrum tataricum*). Les graines ont été fournies par le Professeur Ivan Kreft (Université de Ljubljana, Slovénie) et multipliées au laboratoire.

Le 4 octobre 2023, 120 graines provenant du même échantillon de graines ont été semées dans des bacs de semis contenant du terreau (Substrat d'argile n° 9 ELEVE DCM). Au total, trois bacs de semis contenant chacun 40 graines ont été réalisés puis recouverts d'une vitre et placés en serre tempérée. La température moyenne de la serre était de 21,44°C, l'humidité relative moyenne était de 64,17% et la photopériode était de 16h. L'éclairage de la serre est fourni par la lumière naturelle ainsi qu'un éclairage artificiel supplémentaire grâce à des lampes LED Lumigrow pro de 650 Watts qui produit une intensité lumineuse de 120 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ minimum.

Durant deux semaines environ, les semis ont été arrosés régulièrement et maintenus dans des conditions optimales pour leur germination, le taux de germination était faible et a varié entre 45% et 58% selon les bacs. Le 16 octobre 2023, 60 plantules ont été transférés dans des pots individuels de 14 cm de diamètre qui ont été replacés en serre dans les mêmes conditions avec un arrosage trois fois par semaine.

Le 23 octobre, les 60 plants de sarrasin ont été divisés en quatre groupes auxquels différents traitements de stress ont été appliqués :

Un premier groupe, composé de 18 plants, a été arrosé régulièrement et maintenu dans des conditions de développement optimales durant toute la durée de l'expérience. L'arrosage a été fait trois fois par semaine, les lundi, mercredi et vendredi afin de maintenir une capacité au champ de 100%. Ce groupe est le groupe témoin et a été noté WW pour « Well Watered ».

Un second groupe de 18 plants a été soumis à un stress hydrique (50% de la capacité au champ) durant toute la durée de l'expérience. L'arrosage a été réalisé deux fois par semaine, les lundi et vendredi. Ce groupe représente les plantes en stress hydrique continu et sont notées WSC pour « Water Stress Continu ».

Les deux derniers groupes étaient composés de 12 plants chacun et ils ont été maintenus en stress hydrique à deux moments de l'expérience différents.

Le premier groupe a été arrosé à 50% de la capacité au champ (stress hydrique) durant la phase de croissance végétative c'est-à-dire durant les quatre premières semaines de traitement. Par la suite, l'arrosage est repassé à 3 fois par semaine afin de maintenir 100% de la capacité au champ. Ce groupe est noté WSB pour « Water Stress Beginning ».

Le dernier groupe a quant à lui été arrosé à 100% de la capacité au champ (3 fois par semaine), durant la phase de croissance végétative (c'est-à-dire les 4 premières semaines de stress) mais a subi un stress hydrique (50% de la capacité au champ, arrosage 2 fois par semaine) durant la phase reproductive, c'est-à-dire durant les 4 dernières semaines de traitement. Ce groupe est noté WSE pour « Water Stress Ending ».

La teneur en eau contenue dans la terre est mesurée grâce à une sonde (ProCheck sensor handheld reader). Cet appareil permet de mesurer le « Volumetric water content » (VWC) qui correspond au volume d'eau par rapport au volume total du sol. La mesure du VWC a été réalisée deux fois par semaine, généralement le lundi et le vendredi. Deux mesures étaient à chaque fois prises, une avant l'arrosage et une seconde mesure après arrosage. La VWC du sol était de l'ordre de $40 \pm 5\%$ avant arrosage et $50 \pm 5\%$ après arrosage pour les plantes témoins et celles en période de non-stress tandis qu'elle était de l'ordre de $20 \pm 5\%$ avant arrosage et $40 \pm 5\%$ après arrosage pour les plantes en stress continu et celles en période de stress hydrique. La première mesure a été prise le 23 octobre 2023 et la dernière a été prise le 15 décembre 2023.

Dans la serre, les plants ont été disposés en deux blocs de 24 plantes et un bloc de 12 plantes. Les deux blocs de 24 plantes sont chacun composés de six plantes de chaque condition (WW, WSC, WSE, WSB), tandis que le bloc de 12 plantes, n'est composé que de six plantes de deux conditions, WW et WSC (Figure 6). Les conditions sont disposées en quinconce, en veillant à alterner une condition à l'avant puis une à l'arrière afin que l'eau qui s'écoule lors de l'arrosage ne soit pas absorbée par les plantes en stress hydrique. Les plantes en état de stress sont placées à l'arrière, contrairement aux non stressés qui sont placées à l'avant. Pour rester cohérent, les plantes WSB (en vert) et WSE (en bleu) ont échangés leur place lors du changement de stress. Les blocs ont été espacés pour éviter au maximum les interactions entre eux.

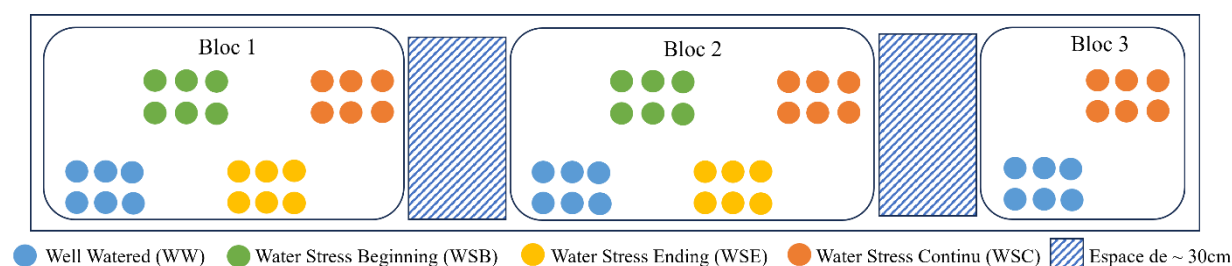


Figure 6 : Répartitions des plantes sur la paillasse de la serre A21 de la semaine 1 à la semaine 4 de l'application de stress puis échange des places entre les WSB et WSE de la semaine 4 à la semaine 5 à la semaine 8 du stress hydrique.

Le changement de stress pour les plants WSB et WSB a été fait après quatre semaines, soit le 20 novembre 2023. L'expérience a duré 75 jours au total, à partir du semis des graines, le 4 octobre, jusqu'à la dernière récolte, le 18 décembre 2023.

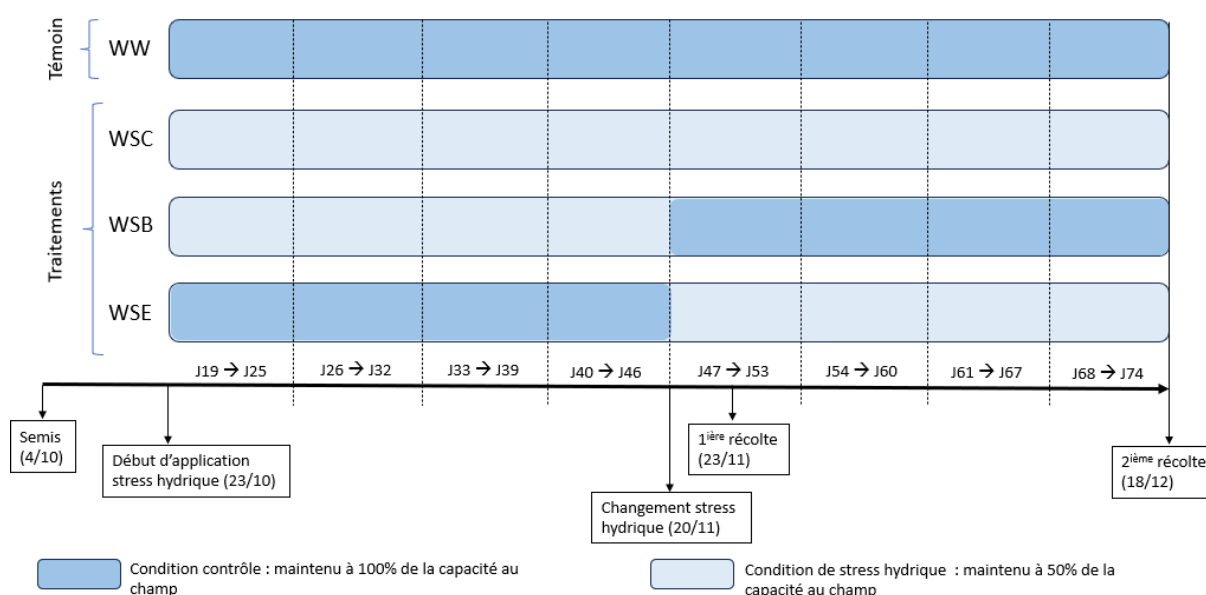


Figure 7 : Schéma des 75 jours d'expérience

2. Mesures de croissance non destructives

2.1. Mesures morphologiques récurrentes

Au cours de l'expérience, le nombre total de feuilles et d'inflorescences a été comptabilisé sur 10 à 12 plantes par condition afin de suivre la croissance des plantes durant les différents traitements. Ces comptages ont été réalisés une fois par semaine.

Lors du comptage du nombre de feuilles par plante, seules les feuilles déroulées mesurant plus de 1 cm ont été prises en compte. Les cotylédons n'ont pas été pris en compte, de même que les feuilles mortes.

En ce qui concerne le nombre d'inflorescences, le comptage a pris en compte les inflorescences dès que les premiers boutons floraux de celles-ci étaient visibles et les inflorescences ont été comptées qu'elles soient en fleurs ou en graines. Le nœud de la première inflorescence a aussi été noté.

2.2. Mesures morphologiques ponctuelles

Lors de la deuxième récolte, plusieurs mesures et comptages ont été réalisés tels que la taille finale de la plante, le nombre de ramification, le nombre de feuilles par ramification et le

nombre d'inflorescences par ramification. Ces mesures ont été réalisées une seule et unique fois sur six plantes différentes pour chaque condition de stress, sur un total de 24 plantes.

Le nombre de ramifications prend en compte toutes les ramifications développées sur la tige principale, toujours sans compter le nœud des cotylédons.

3. Mesures de croissance destructives

3.1. Récoltes

Deux récoltes de matériel frais ont été réalisées au cours des 75 jours d'expérience.

La première récolte a eu lieu le 23 novembre 2023. Lors de celle-ci, six plantes en condition WW et six plantes en condition WSC ont été récoltées. Sur les six plantes récoltées pour les deux conditions de traitement, trois plantes ont été pesées pour mesurer le poids frais puis placées à l'étuve à 60°C durant deux semaines pour mesurer leur poids sec. Les trois dernières plantes ont été récoltées, plongées directement dans de l'azote liquide et conservées dans le congélateur à -80°C.

Après cette première récolte, les quatre conditions de traitements ont donc été équilibrées à 12 plantes chacune.

La deuxième récolte a été réalisée au 75^{ième} jour de l'étude, le 18 décembre. Lors de celle-ci, les 12 dernières plantes restantes de chaque traitement ont été récoltées. Après avoir pesé leur poids frais, trois plantes par condition ont été placées à l'étuve à 60°C pour les mesures de poids secs et pour réaliser le dosage des minéraux. Trois autres plantes par condition ont été récoltées dans de l'azote liquide et stockées dans le congélateur à -80°C pour la mesure du potentiel osmotique ainsi que pour le dosage des polyphénols et flavonoïdes dans les feuilles et les inflorescences. Finalement, les graines des six dernières plantes ont été placées 24h dans l'étuve à 30°C afin de déterminer le poids de 1000 grains et d'effectuer les dosages des teneurs en protéines et en sucres.

3.2. Poids frais et poids secs

Lors des deux récoltes, le 23 novembre et 18 décembre 2023, les mesures des poids frais et poids secs des feuilles, des tiges et des inflorescences ont été réalisées.

Lors de la première récolte, soit quatre semaines après le début de l'application de la première phase du stress, trois plantes en condition WW et trois plantes en conditions WSC ont été récoltées puis divisées pour mesurer séparément le poids frais des feuilles, des tiges et des inflorescences. Ensuite, les différentes parties des plantes ont été placées dans des enveloppes qui ont été mises à l'étuve à 60°C durant deux semaines. Après ces deux semaines, les poids secs de chaque contenu des enveloppes ont été pesés. Aucune plante des conditions WSB et

WSE n'a été récoltée car à ce point de l'expérience, elles étaient dans les mêmes conditions de stress que les WW et WSC.

Lors de la seconde récolte, soit quatre semaines après le changement d'application du stress, trois plantes pour les quatre conditions de traitement ont été récoltées, divisées en feuilles, tiges et inflorescences pour mesurer le poids frais. Ensuite, comme pour la première récolte, les différentes parties des plantes ont été placées à l'étuve à 60°C pendant deux semaines pour permettre de mesurer leurs poids secs.

4. Mesures physiologiques

4.1. PNA

Le chlorophyllomètre (PNA, Plant Nutritional Analyser, Panomex Inc India) a été utilisé pour mesurer la teneur relative en chlorophylle des feuilles.

Les mesures ont été prises sur trois plantes différentes pour chaque traitement, sur 12 plantes au total. La feuille choisie était à chaque fois la mieux développée et la plus grande, généralement la cinquième ou sixième feuille en partant du bas de la tige principale.

Pour chaque feuille, trois mesures ont été réalisées systématiquement à trois endroits différents de la feuille. Pour procéder à la mesure, l'appareil est d'abord calibré. Ensuite, la pince est placée et refermée sur la feuille en faisant attention à éviter la nervure principale. L'appareil affiche, après quelques secondes la teneur en chlorophylle. Les résultats sont alors notés pour chaque feuille et une moyenne sur les trois mesures est réalisée.

4.2. Mesure du potentiel osmotique

La mesure du potentiel osmotique est réalisée à l'aide d'un osmomètre (VAPRO® Vapor Pressure Osmometer Model 5600, EliTechGroup, Logan Utah, United States).

Les mesures du potentiel osmotique ont été faites sur les feuilles récoltées durant la deuxième récolte. Ces feuilles avaient été enroulées et glissées une à une dans un Eppendorf de 2 ml préalablement percé d'un trou au-dessus, au niveau du bouchon, et de trois trous en dessous de l'Eppendorf. Ces trous ont été réalisés à l'aide d'une aiguille chauffée à l'aide d'un bec bunsen. Ensuite, l'Eppendorf a été fermé et plongé dans l'azote liquide avant d'être stocké au congélateur à -80°C. L'opération est répétée pour une feuille par plante en prenant les feuilles de trois plantes différentes par condition de traitement.

Le jour de la mesure avec l'osmomètre, le 27 mars 2024, les Eppendorf sont plongés quelques secondes dans l'azote puis dégelés 5 minutes environ. Ce cycle de gel/ dégel est répété trois fois avec chaque échantillon. Les Eppendorf troués sont ensuite placés dans des Eppendorf non

troués et centrifugés (4°C, 8000 rpm) pendant 15 minutes. A la sortie de la centrifugeuse, les Eppendorf sont mis dans de la glace. Pendant ce temps l'osmomètre est calibré, et 10 µL de solution surnageante sont alors prélevés de l'Eppendorf et déposés sur un papier filtre qui sera finalement lu par l'appareil. La mesure est réalisée trois fois par échantillon.

L'osmomètre donne une valeur qui correspond au potentiel osmotique de la solution en mmol/kg. Pour obtenir la pression osmotique en MPa, une conversion est réalisée grâce à la formule suivante :

$$PO \text{ (MPa)} = \left[\frac{\left(PO \left(\frac{\text{mmol}}{\text{kg}} \right) \times 2,577433 \right)}{1000} \right]^{-1}$$

4.3. Teneurs en anti-oxydants (flavonoïdes et polyphénols)

Le dosage des antioxydants a été réalisé sur les inflorescences en graines et sur les feuilles récoltées durant la deuxième récolte puis conservées au congélateur à -80°C. Les échantillons congelés ont ensuite été broyés dans de l'azote liquide à l'aide d'un pilon et d'un mortier. Les dosages ont été réalisés les 10 et 11 avril, soit presque quatre mois après leur récolte. Les dosages des polyphénols et des flavonoïdes nécessitent tous les deux une étape d'extraction préalable. Celle-ci est réalisée dans du méthanol à 80% selon la méthode Zhang et al. (2010). Environ 100 mg sont pesés et mélangés avec 2 mL de CH₃OH 80% dans un Eppendorf de 2 mL. Les échantillons sont ensuite centrifugés à 20 000 g pendant 20 min à 4°C. Si besoin, les extraits peuvent être conservés au congélateur à -20°C.

Les dosages en antioxydants ont été réalisés sur 22 échantillons au total, c'est-à-dire trois échantillons par conditions sauf pour la condition WSC qui ne comptait que deux échantillons (manque de matière végétale).

4.3.1. Dosage des flavonoïdes totaux

Une fois l'extraction faite, le dosage est réalisé en faisant intervenir les propriétés chélatantes des ions. Le principe de cette méthode repose sur la capacité des flavonoïdes à former des complexes stables avec l'ion d'aluminium, Al³⁺.

Dans des tubes en verres, 1 mL de surnageant de chaque solution est ajouté à 1 mL de solution de AlCl₃ 2%. Chaque tube est ensuite agité au vortex et incubé 10 minutes dans l'obscurité. Trois échantillons parmi les douze ont été dilués cinq fois afin d'obtenir une absorbance qui ne sort pas de la droite d'étalonnage établie. Pour chaque série d'échantillons réalisée, il faut veiller à préparer au minimum un blanc composé uniquement de 1 mL de CH₃OH 80% et de 1 mL de AlCl₃ 2%, dans des conditions opératoires identiques.

Pour réaliser la courbe d'étalonnage, on utilise une gamme d'étalons préparés dans les mêmes conditions opératoires que les échantillons, en utilisant une solution mère de quercétine (1 mg/mL) diluée 20 fois. La gamme s'étend de 0 à 5 µg/mL avec un pas de 5.

Pour finir, l'ensemble des tubes en verre sont versés dans des cuvettes annotées pour procéder à la lecture de leur absorbance à 440 nm par un spectrophotomètre (UV-1800, Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan).

La concentration finale en flavonoïdes totaux est exprimée en mg/g MF d'équivalents quercétine et se calcule grâce à la formule suivante :

$$Concentration \left[\frac{mg}{g} MF \right] = \frac{Concentration\ brute \left[\frac{\mu g}{mL} \right] * 10^{-3} * Volume [mL]}{Poids [g]}$$

4.3.2. Dosage des polyphénols totaux

Après extraction au méthanol, le dosage des polyphénols totaux est réalisé par la méthode Sigleton et Rossi (1965) in D. Ramful 2010, qui utilise la méthode colorimétrique de Folin-Ciocalteu.

La première étape de ce dosage consiste à prélever 200 µL de surnageant de chaque échantillon et d'ajouter 2800 µL d'eau distillée et 200 µL de réactif de Folin-Ciocalteu dans des tubes en verre. Après 3 minutes d'incubation, 0,8 mL de Na₂CO₃ 20% sont ajoutés dans chaque tube qui sont ensuite homogénéisés à l'aide d'un vortex, avant d'être placés dans un bain marie à 40°C durant 40 minutes. Une fois sortis du bain marie, on peut observer une couleur plus ou moins bleu en fonction de la concentration de polyphénols qu'ils contiennent.

Une courbe d'étalonnage est réalisée avec des étalons préparés à partir d'une solution mère d'acide gallique (1 mg/mL) diluée deux fois. Les différentes concentrations sont obtenues par ajout de CH₃OH 80%. La gamme de concentrations standards s'étend de 0 à 500 µg/L avec un pas de 50 µg/L. Les étalons suivent ensuite le même mode opératoire que les échantillons.

Pour finir, l'ensemble des échantillons et des étalons sont transvasés dans des cuvettes et pour être lus au spectrophotomètre (UV-1800, Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan) à une absorbance de 760 nm. La teneur totale en polyphénols est obtenue par la formule suivante :

$$Concentration \left[\frac{mg}{g} MF \right] = \frac{Concentration\ brute \left[\frac{\mu g}{mL} \right] * 10^{-3} * Volume (mL)}{Poids [g]}$$

5. Paramètres de rendement et des qualités nutritionnelles

5.1. Poids de 1000 grains

Le poids de 1000 grains a été estimé sur les graines des quatre conditions de traitement récoltées durant la deuxième récolte. Les graines ont été séchées 24h dans l'étuve à 30°C directement après la récolte, le 18 décembre 2023 puis pesées le 16 avril 2024. Pour estimer le poids de 1000 grains, 50 graines par condition ont été pesées puis rapportées à 1000 graines par une règle de trois. Ces mesures ont été faites en triplicats pour chaque condition.

5.2. Teneurs en protéines

Le dosage des protéines totales a été réalisé par la méthode de Bradford sur les graines récoltées lors de la deuxième récolte et séchées à l'étuve à 30°C durant 24h.

Les graines de chaque condition de traitement ont été broyées grâce à une broyeuse (Cryomill, Retsch, Haan, Allemagne). 50 mg de graines broyées ont été pesés dans un Eppendorf de 2 ml auxquels ont été ajoutés 500 µL de solution tampon phosphate (200 mM, pH 7,4). Trois réplicas ont été réalisés pour chaque condition de traitement, ce qui fait un total de 12 échantillons à doser. Les différents tubes Eppendorf sont alors mélangés vigoureusement au vortex et centrifugés à 4°C, à une vitesse de 12000 g pendant 15 minutes. En parallèle, une gamme d'étalons est préparée. Pour ce faire, différentes quantités de solution BSA (Bovine Serum Albumine, 1mg/L) sont mélangées avec de la solution tampon phosphate pour arriver à douze étalons de concentrations finale 0, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 2500 [µg/mL].

Ensuite, 100 µL de surnageant des échantillons et de la gamme d'étalons sont prélevés et mis dans des tubes en verre, en veillant à faire trois réplicas par échantillon (36 échantillons au total) et 3 mL de réactif de Bradford sont ajoutés dans chaque tube. Le réactif de Bradford a été préalablement préparé en dissolvant 100 mg de bleu de Coomassie dans 50 mL d'éthanol à 95% auquel ont été ajoutés 100 mL de H₃PO₄ 85% avant d'être porté à un litre avec de l'eau déminéralisée.

L'ensemble des tubes sont ensuite incubés à température ambiante. Pour finir, on a procédé à la lecture de l'absorbance à 595 nm à l'aide d'un spectrophotomètre (UV-1800, Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan).

La concentration en protéines totales dans l'échantillon de départ est calculée grâce à la formule suivante :

$$Concentration \left[\frac{mg}{g} MF \right] = \frac{Concentration\ brute \left(\frac{\mu g}{mL} \right) * 10^{-3} * Volume (mL)}{Poids (g)}$$

5.3. Teneurs en sucres solubles

Le dosage des sucres solubles a été réalisé sur les graines récoltées durant la deuxième récolte et séchées à l'étuve à 30°C. Trois répliques pour chaque condition de traitement ont été réalisées. On compte un total de douze échantillons.

Les différents échantillons de graines ont été préalablement broyés à la broyeuse (Cryomill, Retsch, Haan, Allemagne) comme décrit précédemment. Ensuite 500 mg de chaque ont été mis dans des falcons contenant 4 ml d'éthanol 70% et mis dans la glace pendant 5 minutes.

Les différents échantillons sont ensuite centrifugés à 8000 rpm, à 4°C pendant 10 minutes. Après centrifugation, les surnageants sont récupérés en filtrant le contenu de chaque falcon dans un nouveau falcon à l'aide d'un entonnoir et un papier filtre Whatman. Les culots résiduels des douze échantillons sont récupérés en y ajoutant 2 ml d'éthanol 70%. Ils sont ensuite mélangés au vortex puis laissés au repos durant 5 minutes. Cette étape est réalisée trois fois et les surnageants filtrés sont ajoutés au fur et à mesure au surnageant précédent dans les nouveaux falcons. Il est important de veiller à garder les échantillons dans la glace lorsqu'ils sont en dehors de la centrifugeuse. Une fois les trois répétitions effectuées, le volume des falcons contenant les surnageant filtrés est porté à 7 ml avec de l'éthanol 70%.

Avant la lecture au spectrophotomètre, les échantillons sont dilués 10 fois en prélevant 20 µL de chaque falcon dans des tubes en verre auxquels sont ajoutés 180 µL d'éthanol 70%.

Une gamme d'étalon est préparée simultanément en mélangeant différentes quantités de solution de glucose et d'éthanol à 70% dans des tubes en verres. On obtient une gamme avec des concentration de 0, 100, 200, 300, 400 et 500 mg/L.

Ensuite, 1 mL de réactif à l'anthrone est ajouté à chaque tube en verre qui sont ensuite placés au bain marie à 100°C durant 10 minutes. A la sortie du bain, les tubes sont directement placés dans de la glace afin de stopper la réaction avant d'être mélangés au vortex et finalement lus au spectrophotomètre (UV-1800, Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan) à une absorbance de 625 nm.

Le calcul de la concentration en sucres solubles totaux dans l'échantillon de départ est calculée grâce à la formule suivante :

$$Concentration \left[\frac{mg}{g} MF \right] = \left[\frac{Concentration\ brute \left(\frac{mg}{L} \right) * Volume (L)}{Poids (g)} \right] * facteur\ de\ dilution$$

5.4. Teneurs en minéraux

Le dosage de la teneur en minéraux a été réalisée sur les graines récoltées durant la deuxième récolte et séchées à l'étuve à 60°C. Trois plantes par conditions de traitement ont été utilisées, pour un total de 12 échantillons. Le dosage des différents éléments minéraux est réalisé par spectroscopie à absorption atomique (SOLAAR S4, Thermo Fisher Scientific).

La première étape fut de peser environ 100 mg de graines (5-8 graines) en notant le poids exact pour chaque échantillon.

La matière organique pesée est alors dissoute dans un jaugé de 10 ml avec 4 ml d'acide nitrique concentré pendant une nuit. Lorsque la matière organique est complètement dissoute, les jaugés sont placés sur un bain de sable chauffé progressivement afin d'accélérer la minéralisation et lorsque la solution devient incolore, la température est augmentée pour faire évaporer complètement l'acide nitrique. Lorsque le jaugé ne contient plus d'acide nitrique et qu'il ne reste que la matière minérale, les résidus sont dissouts à l'aide d'eau régale (1,5 ml HCl concentré et 0,5 ml d'acide nitrique concentré) à raison de 2 ml par jaugé qui sont alors placés sur un bain de sable quelques minutes. Une fois que les résidus sont dissouts, le jaugé est retiré du bain de sable et porté au trait à 10 ml avec de l'eau déminéralisée. Finalement l'échantillon est filtré dans un falcon de 15 ml grâce à un papier filtre Whatman et un entonnoir.

Les minéraux qui ont été dosés sont le Na, K, Zn, Cu, Ca, Mg et le Fe.

Pour le Zn, le Ca, le Cu, le Fe et le Na, aucune dilution n'a été nécessaire. Pour le Mg, une dilution au dixième a été réalisée dans un nouveau jaugé de 15 ml à l'aide d'1 ml de la solution non diluée, de 1 ml de LaCl₃ 10% (m/v) et 8 ml d'eau déminéralisée. Le K a quant à lui été mesuré après une dilution diluée 100 fois en mélangeant 1 ml de l'échantillon dilué au 10^{ième}, 0,9 ml de LaCl₃ 10% (m/v) et 8,1 ml d'eau déminéralisée.

La concentration finale dans l'échantillon en mg/g de matière fraîche s'obtient à l'aide de la formule suivante :

$$Concentration \left[\frac{\mu g}{g} MF \right] = \left[\frac{Concentration\ brute \left(\frac{mg}{L} \right) * 10^3 * Volume (L)}{Poids (g)} \right] * facteur\ de\ dilution$$

6. Analyse statistique

L'analyse statistique des données et la visualisation des résultats ont été réalisées grâce au langage de programmation R (version 4.4.0) via le logiciel RStudio.

Les données de croissance, de production, de développement et des qualités nutritionnelles ont été analysées et comparées entre les différentes conditions de traitement relatives aux différentes conditions de stress hydrique (WW, WSC, WSB et WSE). Pour chaque jeu de données, la normalité des résidus a été vérifiée grâce au test de Shapiro et l'homoscédasticité des variances a été vérifiée par le test de Levene. Une ANOVA 1 a été réalisée sur les données récoltées de manière ponctuelle, au moment des récoltes. Une ANOVA 2 a par ailleurs été réalisée sur les données récoltées au cours du temps, afin de connaître l'effet du temps, des conditions de traitement et l'interaction des deux sur le développement du sarrasin de Tartarie.

Des comparaisons multiples ont ensuite été réalisées entre les différentes conditions de traitement via le test de Tukey. En cas de données non paramétriques, un test de Kruskal-Wallis remplaçait le test ANOVA.

Sauf indication contraire, les résultats sont présentés sous la forme de moyenne $\pm$ écart-type.

IV. Résultats

1. Paramètres environnementaux

1.1. Evolution de la température dans la serre

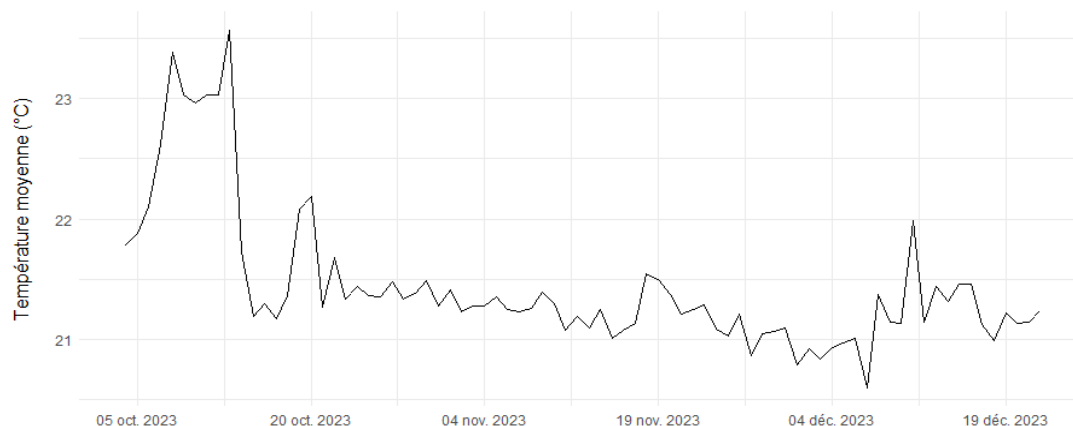


Figure 8 : Evolution de la température moyenne journalière dans la serre entre le 4 octobre 2023 et le 22 décembre 2023.

La température moyenne de la serre dans laquelle s'est déroulé était de $21,44 \pm 1,31$ °C entre le 4 octobre 2023, date de semis, et le 22 décembre 2023, date de la dernière récolte (Figure 8). La température maximale atteinte durant cette période était de 28,8°C le 10 octobre 2023 et la température minimale atteinte était de 18,6°C le 6 décembre 2023.

1.2. Evolution de l'humidité relative dans la serre

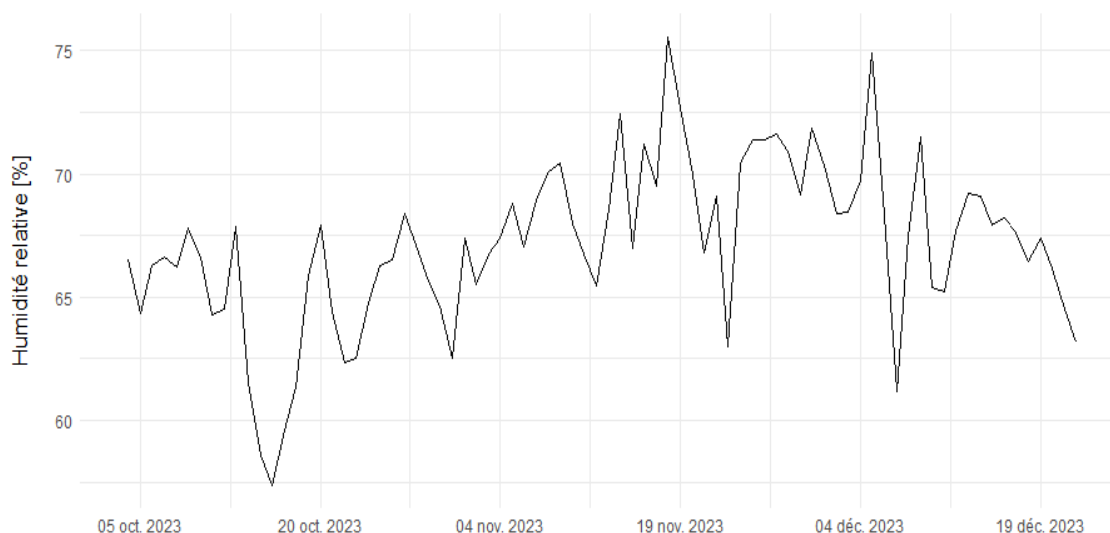


Figure 9 : Evolution de l'humidité relative moyenne journalière dans la serre entre le 4 octobre 2023 et le 22 décembre 2023.

L'humidité relative moyenne de la serre dans laquelle s'est déroulée l'expérience était de $67,17 \pm 6,08$ % entre le 4 octobre 2023 et le 22 décembre 2023 (Figure 9). Le taux d'humidité relative

maximal atteint durant cette période était de 82% le 19 novembre 2023 et le taux d'humidité minimal atteint était de 47% mesuré le 14, 16 et 17 octobre ainsi que le 11 novembre 2023.

1.3. Teneur en eau de la terre des plantes

La figure 10 montre l'évolution de la teneur moyenne en eau mesurée dans la terre avant chaque arrosage des plants de sarrasin de Tartarie. Les mesures ont été réalisées deux fois par semaine sur une durée totale de 8 semaines. La teneur en eau a été mesurée pour la première fois au 19^{ième} jour de l'expérience, qui correspond au premier jour d'application des traitements de stress hydrique. Le test de Kruskal-Wallis montre des différences significatives pour la teneur en eau du sol entre conditions de traitement avant l'arrosage de plantes ($\chi^2_{31} = 111.79$ et $P < 2.2 \times 10^{-16}$).

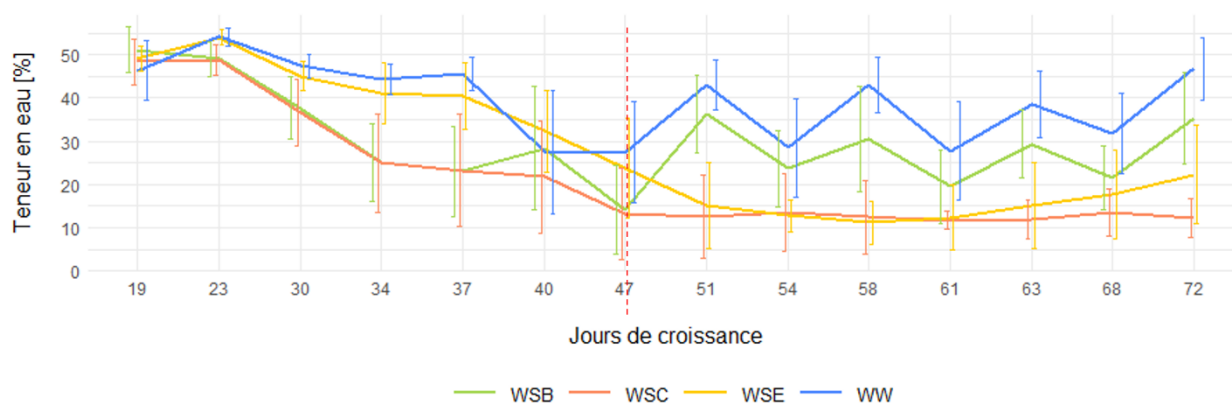


Figure 10 : Evolution de la teneur moyenne en eau du sol mesurée au cours du temps avant l'arrosage pour chaque condition de traitement chez le sarrasin de Tartarie, variété Zlata.

La ligne rouge (pointillée) indique le moment de changement de stress. (WSB : stress hydrique en début de culture, WSC, stress hydrique continu ; WSE : stress hydrique en fin de culture ; WW : plantes témoins bien arrosées (100% FC)).

Dès la première mesure, l'ensemble des teneurs moyennes en eau mesurées pour chaque condition ont diminué jusqu'au 47^{ième} jour de traitement environ. Du 19^{ième} jour au 47^{ième} jour, les plantes en condition WW et WSE, qui n'étaient pas en stress hydrique à ce moment de l'expérience, ont des teneurs en eau du sol plus élevées que les plantes en condition WSB et WSC, qui étaient en stress hydrique. Le 47^{ième} jour correspond au changement de condition pour les plantes WSB et WSE. À partir du 47^{ième} jour de traitement, la teneur moyenne en eau du sol des plantes WSB a réaugmenté, mais est restée cependant légèrement inférieure à celle des plantes WW pour le reste de l'expérience. À cette même date, la teneur en eau des plantes WSE a diminué et est devenue similaire à celle des plantes WSC à partir du 54^{ième} jour de traitement. Dans ces deux conditions (WSE et WSC), la teneur moyenne en eau du sol s'est stabilisée entre 10 et 15%. De manière générale, les plantes en condition WW avaient une teneur en eau du sol supérieure aux plantes des autres conditions et les plantes en condition WSC avaient une teneur en eau du sol plus basse que les autres conditions de traitement sur toute la durée de l'expérience. Les plantes en condition de traitement WSB et WSE avaient des teneurs en eau du sol intermédiaires qui se rapprochaient de celle de WSC lorsqu'elles étaient en stress

hydrique et de celle de WW lorsqu'elles étaient en condition non stressée. Les courbes des traitements WW et WSB montraient des fluctuations brusques mais constantes à partir du 47^{ième} jour de traitement, tandis que celles des traitements WSC et WSE étaient plus stables, sans variations, à partir du 47^{ième} jour.

2. Paramètres de croissance

2.1. Production de feuilles

Le nombre de feuilles par plante a été compté à partir du 19^{ième} jour de croissance des plantes, lors de l'apparition des premières feuilles. La figure 11 montre une augmentation du nombre de feuilles pour les quatre conditions de traitement tout au long de la période de croissance des plantes. Le nombre de feuilles a augmenté selon une tendance similaire pour les 4 traitements jusqu'au 34^{ième} jour de croissance environ ; ensuite des tendances différentes sont observées selon les traitements :

Les plantes WSC avaient un nombre de feuilles qui augmentait continuellement sur toute la durée de l'expérience et présentaient le plus de feuilles au total en fin de culture. Les plantes en condition WW ont montré une évolution du nombre de feuilles plus lente et qui a fini par atteindre un plateau à partir du jour 54. En ce qui concerne les conditions de traitement WSB et WSE, les plantes présentaient un nombre de feuilles similaire au cours de leur croissance jusqu'au 47^{ième} jour environ, avec cependant un nombre de feuilles légèrement inférieur pour la condition WSB. Après 47 jours, les plantes WSB ont continué une production de feuilles croissante et régulière jusqu'à la récolte. L'augmentation du nombre de feuilles des plantes WSE a continué d'augmenter jusqu'au 54^{ième} jour, puis a atteint un plateau jusqu'au dernier jour de mesure.

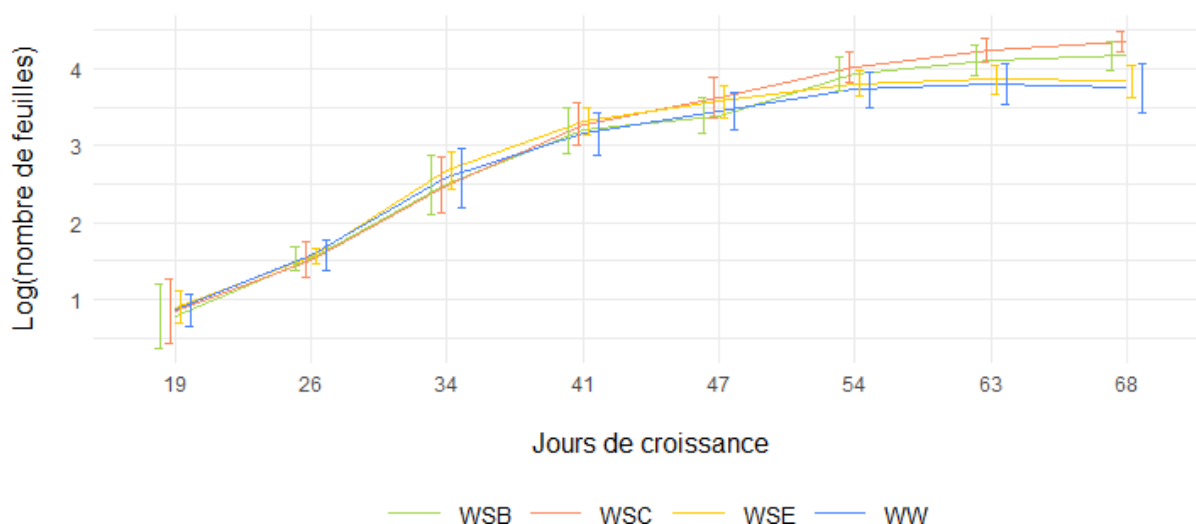


Figure 11 : Evolution du nombre de feuilles par condition de traitement en fonction du jour de croissance. (WSB : stress hydrique en début de culture, WSC, stress hydrique continu ; WSE : stress hydrique en fin de culture ; WW : plantes témoins bien arrosées (100% FC)).

Une transformation logarithmique des données a été réalisée afin de respecter l'homogénéité et la normalité des résidus lors du test ANOVA 2 sur l'effet des conditions de traitement ($F_{3, 347} = 4.560$ et $P = 0.00378$), du jour de croissance ($F_{7,347} = 1034.30$ et $P < 2*10^{-16}$) et de l'interaction conditions de traitement et jour de croissance ($F_{21, 347} = 3.124$ et $P = 7.05*10^{-6}$). La figure en valeurs non transformées se trouve en Annexe 1.

Le nombre total de feuilles par plante lors de la deuxième récolte est repris dans le tableau 2 et montre une différence significative en fonction des traitements. Les plantes en condition WSC sont celles qui avaient produit le plus de feuilles, tandis que les plantes en condition WW en avaient produit le moins, et que les plantes des traitements WSB et WSE avaient un nombre de feuilles intermédiaire.

Tableau 2 : Nombre de feuilles à la deuxième récolte en fonction des conditions de traitement (WSB : stress hydrique en début de culture, WSC, stress hydrique continu ; WSE : stress hydrique en fin de culture ; WW : plantes témoins bien arrosées (100% FC)).

	Nombre de feuilles à la deuxième récolte *	
WSB	53.67 ± 9.223	b
WSC	76.17 ± 9.496	c
WSE	43 ± 12.17	ab
WW	28.17 ± 14.99	a
Anova 1	Traitements	$F_{3,20} = 17.87$ $P = 7.041*10^{-6}$

** Les conditions de traitement qui partagent une même lettre ne sont pas significativement différentes à un seuil de 5% (test de Tukey)*

2.2. Production d'inflorescences

Le nombre d'inflorescences des quatre traitements a augmenté en fonction du temps. Le comptage a commencé à partir du jour 41, au moment où les premières inflorescences sont apparues (Figure 12).

Une transformation des données a été réalisée afin de respecter l'homogénéité et la normalité des résidus lors du test ANOVA 2 sur l'effet des conditions de traitement ($F_{3, 215} = 0.647$ et $P = 0.58549$), du jour de croissance ($F_{4, 215} = 384.805$ et $P < 2 \cdot 10^{-16}$) et de l'interaction conditions de traitement et jour de croissance ($F_{12, 215} = 2.872$ et $P = 0.00108$). La figure en valeurs non transformées se trouve en Annexe 2.

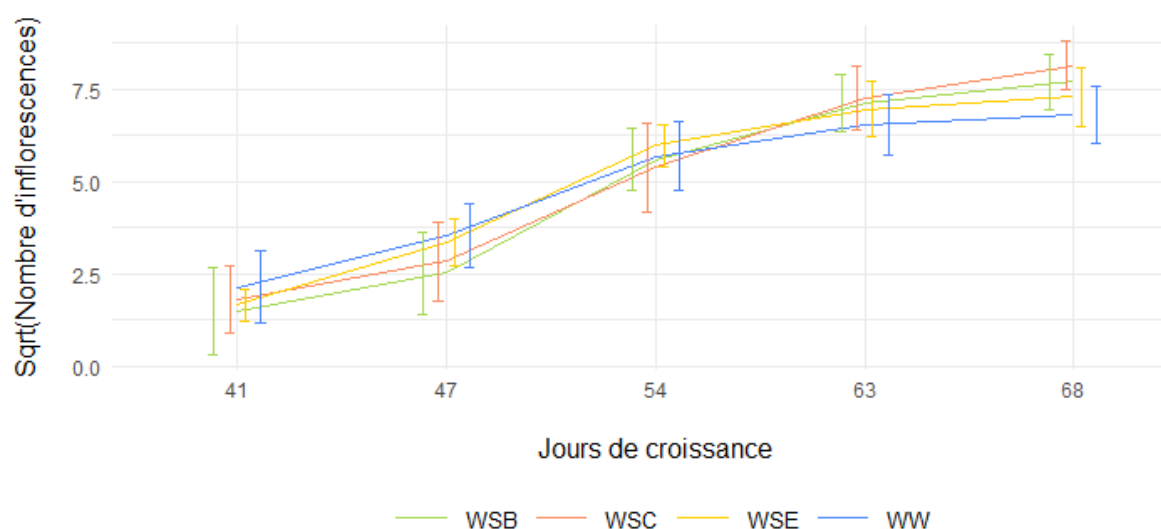


Figure 12 : Evolution du nombre d'inflorescences par condition de traitement en fonction du jour de croissance. (WSB : stress hydrique en début de culture, WSC, stress hydrique continu ; WSE : stress hydrique en fin de culture ; WW : plantes témoins bien arrosées (100% FC)).

Les plantes en condition WW avaient un nombre d'inflorescences supérieur aux autres conditions jusqu'au moment du changement de stress, au 47^{ième} jour. L'augmentation du nombre d'inflorescences était relativement similaire entre des différentes conditions jusqu'au jour 54, date à partir de laquelle différentes tendances vont se démarquer. Le taux d'augmentation du nombre d'inflorescences pour les plantes en condition WW a ralenti et s'est stabilisé progressivement à partir du jour 63. À l'opposé, le nombre d'inflorescences produites par les plantes en condition WSC a augmenté rapidement à partir du jour 47 et son taux de production s'est maintenu jusqu'au dernier jour de mesure. En ce qui concerne les conditions intermédiaires WSB et WSE, les plantes WSB ont produit moins d'inflorescences que celles de la condition WSE jusqu'au 60^{ième} jour environ où la tendance s'est inversée et le nombre d'inflorescences produites par les plantes en condition WSB a surpassé celui des plantes en condition WSE jusqu'à la fin de l'expérience.

L'ANOVA 1 a montré que le nombre d'inflorescences différait entre les différentes conditions de traitement ($F_{3,20} = 5.78$ et $P = 0.00515$, Tableau 3). Le nombre d'inflorescences final de la condition WSC était significativement plus élevé que celui des conditions WW et WSE. En effet, les plantes en condition WW et WSE ont produit respectivement 64,91% et 38,94% moins d'inflorescences que les plantes en condition WSC. Les plantes en condition WSB avaient un nombre final d'inflorescences intermédiaire par rapport aux autres traitements.

Tableau 3 : Nombre d'inflorescences obtenu lors de la deuxième récolte en fonction des différentes conditions de traitement (WSB : stress hydrique en début de culture, WSC, stress hydrique continu ; WSE : stress hydrique en fin de culture ; WW : plantes témoins bien arrosées (100% FC)).

	Nombre d'inflorescence à la deuxième récolte *	
WSB	66.83 ± 18.9	ab
WSC	83.83 ± 9.704	b
WSE	60.33 ± 14.14	a
WW	50.83 ± 12.29	a
Anova 1	Traitements	$F_{3,20} = 5.78$ $P = 0.00515$

* Les conditions de traitement qui partagent une même lettre ne sont pas significativement différentes à un seuil de 5% (test de Tukey)

Le nœud d'apparition de la première inflorescence ne variait pas significativement en fonction du traitement, comme le confirme le test non paramétrique de Kruskal-Wallis ($\chi^2_3 = 1.1963$, $P < 0.7539$, Figure 13). La première inflorescence est apparue en moyenne au niveau du 8^{ième} nœud. Les plantes en condition WSB présentaient une variabilité plus importante que les autres conditions concernant le temps de floraison, avec un nœud d'apparition de la première inflorescence variant entre le 5^{ième} et 10^{ième} nœud (Annexe 3).

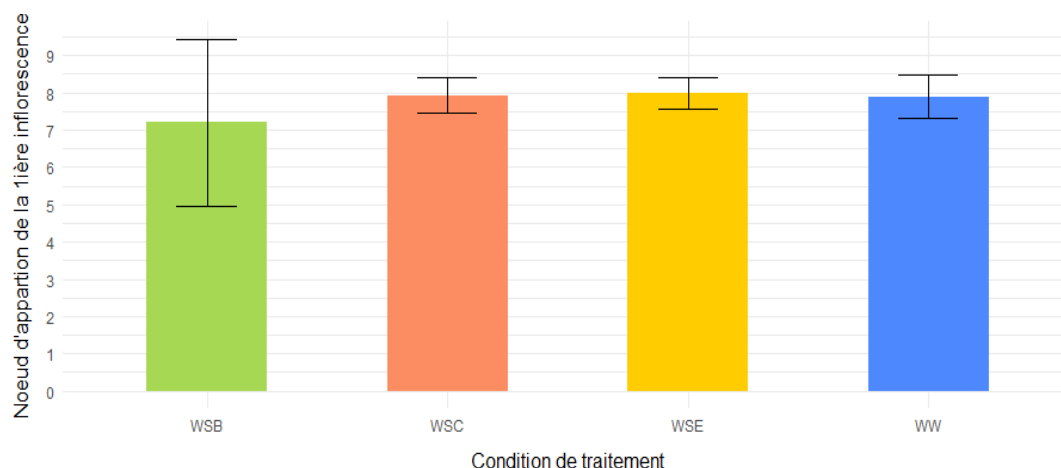


Figure 13 : Noeud d'apparition de la première inflorescence en fonction des différentes conditions de traitement (WSB : stress hydrique en début de culture, WSC, stress hydrique continu ; WSE : stress hydrique en fin de culture ; WW : plantes témoins bien arrosées (100% FC)). Les conditions de traitement qui partagent une même lettre ne sont pas significativement différentes à un seuil de 5% (test de Tukey)

2.3 Taille finale des plantes

La taille moyenne finale des plantes ne variait pas significativement entre les différentes conditions de traitement ($F_{3,20} = 3.66$ et $P = 0.779$, Figure 14). Les tailles moyennes variaient entre 119 cm et 110 cm pour les conditions WSC et WW respectivement (Annexe 3). Les tailles des plantes en conditions WSB et WW étaient plus variables entre les différentes plantes comparées à la condition WSC, comme le montrent les écart-types.

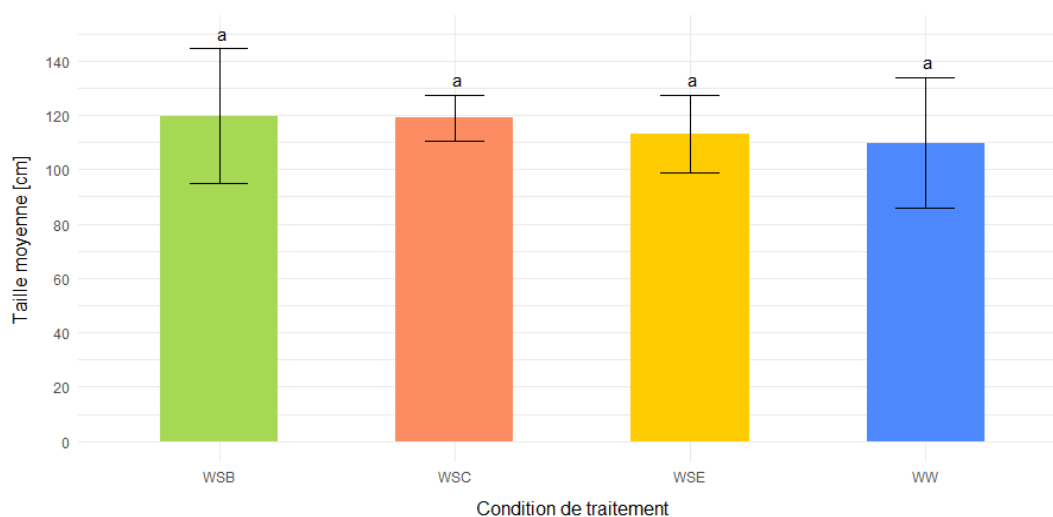


Figure 14 : Taille finale [cm] des plantes mesurées lors de la deuxième récolte en fonction des différentes conditions de traitement (WSB : stress hydrique en début de culture, WSC, stress hydrique continu ; WSE : stress hydrique en fin de culture ; WW : plantes témoins bien arrosées (100% FC)). Les conditions de traitement qui partagent une même lettre ne sont pas significativement différentes à un seuil de 5% (test de Tukey).

2.4 Nombre de ramifications final

Le nombre de ramifications final des plantes ne variait pas significativement entre les différentes conditions de traitements ($F_{3,8} = 0.282$ et $P = 0.837$, Figure 15). Il était en moyenne de 7 pour les quatre conditions de traitements (Annexe 3); il variait entre un maximum de 9 pour une plante en condition WSB et un minimum de 5 pour les conditions WW, WSB et WSE. Les plantes en condition WSC ont toutes, à l'exception d'une, développé 7 ramifications. Les lots de plantes des conditions WW et WSE présentaient plus de variabilité au niveau du nombre final de ramifications produites.

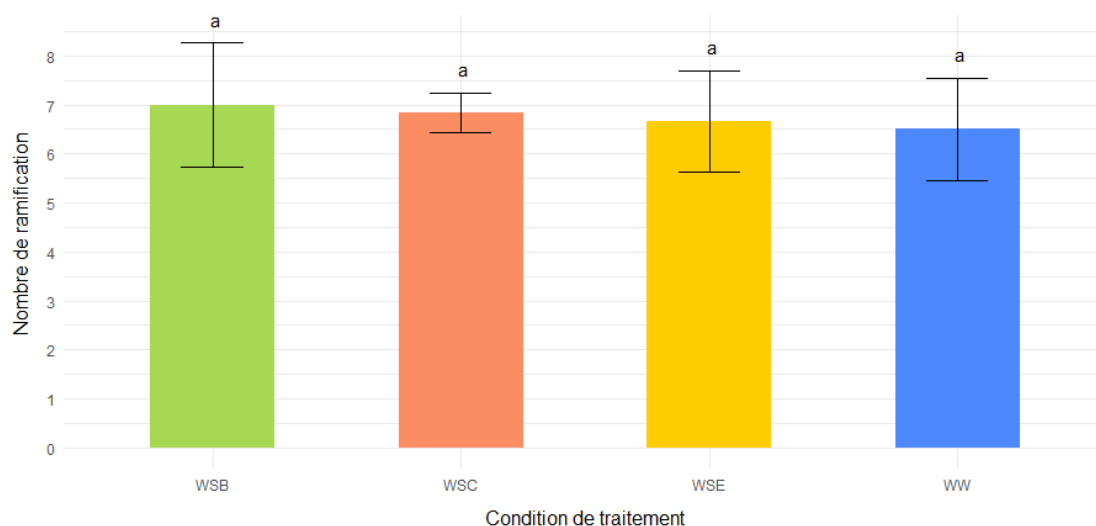


Figure 15 : Nombre de ramifications total compté lors de la deuxième récolte en fonction des différentes conditions de traitement (WSB : stress hydrique en début de culture, WSC, stress hydrique continu ; WSE : stress hydrique en fin de culture ; WW : plantes témoins bien arrosées (100% FC)). Les conditions de traitement qui partagent une même lettre ne sont pas significativement différentes à un seuil de 5% (test de Tukey).

On remarque cependant que le nombre moyen de feuilles et d'inflorescences développés par ramification variait significativement en fonction de la condition de traitement des plantes.

En termes de nombre de feuilles moyen par ramification, les plantes en condition WSC en produisaient le plus tandis que les plantes en condition WW en produisaient le moins ($F_{3,158} = 46.92$ et $P < 2 \cdot 10^{-16}$, Figure 16). Les plantes en conditions WSC avaient en moyenne 11 feuilles sur leurs ramifications, contrairement aux plantes en condition WW qui n'en avaient en moyenne que 4. Les plantes des conditions WSB et WSE avaient quant à elles entre 6 et 7 feuilles par ramification. Pour l'ensemble des conditions de traitements, on observe une variabilité importante du nombre de feuilles par ramification, avec une variance moyenne de ± 3 feuilles par ramification (Annexe 3).

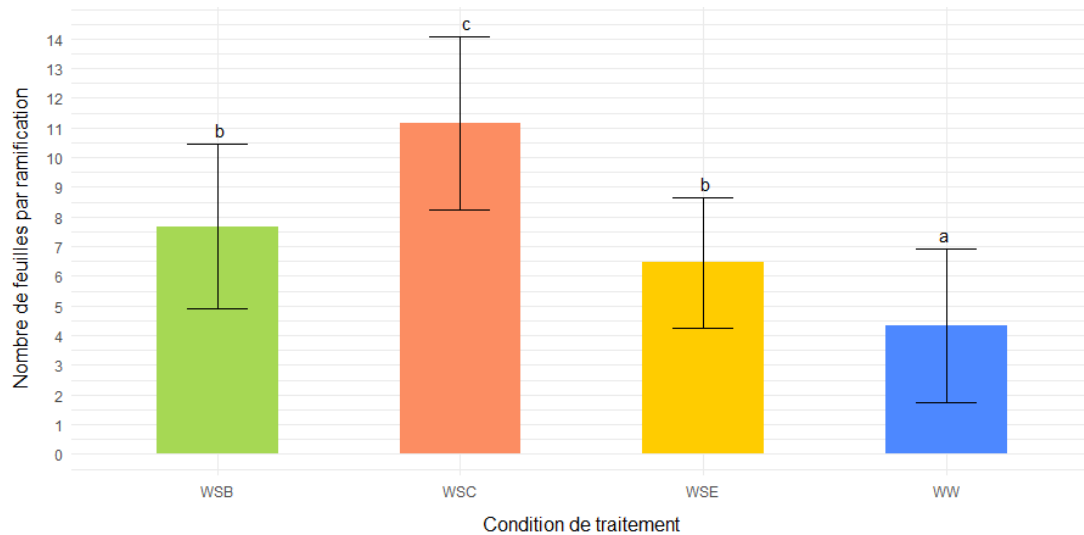


Figure 16 : Nombre de feuilles moyen par ramifications en fonctions des différentes conditions de traitement (WSB : stress hydrique en début de culture, WSC, stress hydrique continu ; WSE : stress hydrique en fin de culture ; WW : plantes témoins bien arrosées (100% FC)). Les conditions de traitement qui partagent une même lettre ne sont pas significativement différentes à un seuil de 5% (test de Tukey).

En ce qui concerne le nombre d'inflorescences moyen par ramification, une différence est aussi observée entre les différentes conditions de traitement ($F_{3,158} = 11,12$ et $P < 1.16 \cdot 10^{-6}$, Figure 17). Cependant, contrairement au nombre de feuilles moyen par ramification, le nombre d'inflorescences était moins contrasté entre les différents traitements. En effet, les conditions WW, WSB et WSE avaient un nombre d'inflorescences par ramification similaire mais très variable, pouvant aller d'une seule inflorescence à un maximum de 17 inflorescences par ramification. Les plantes en conditions WSC avaient une moyenne de $12,27 \pm 3,77$ inflorescences par ramification (Annexe 3).

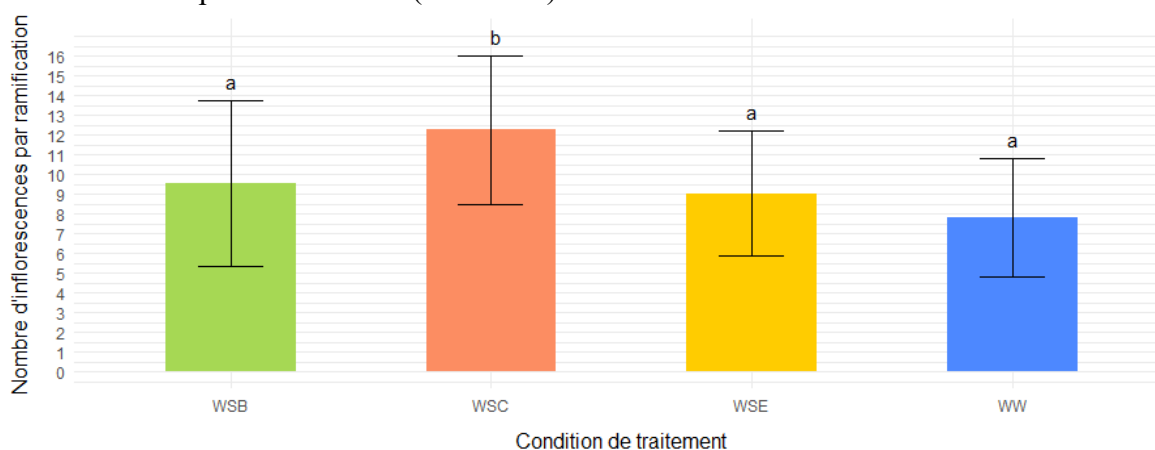


Figure 17 : Nombre d'inflorescences moyen par ramifications en fonctions des différentes conditions de traitement (WSB : stress hydrique en début de culture, WSC, stress hydrique continu ; WSE : stress hydrique en fin de culture ; WW : plantes témoins bien arrosées (100% FC)). Les conditions de traitement qui partagent une même lettre ne sont pas significativement différentes à un seuil de 5% (test de Tukey).

2.5 Poids frais et poids secs

Les poids frais et secs aériens totaux des plantes pesées lors de chaque récolte ne présentaient aucune différence significative entre les différentes conditions (Tableau 4). L'ANOVA 1 réalisée sur les teneurs en eau des plantes de la première récolte montre que la teneur en eau était légèrement plus élevée pour les plantes en condition de traitement WW que pour les plantes en condition de traitement WSC ($F_{1,4} = 10.68$ et $P = 0.031$) mais cette différence n'était plus significative lors de la mesure de la teneur en eau des plantes entre les différents traitements à la deuxième récolte ($F_{3,8} = 1.729$ et $P = 0.238$).

Tableau 4 : Poids frais [g], poids secs [g], teneur en eau [%], indice de récolte [%] et indice de tolérance [%] pour les différentes conditions à la première récolte et à la deuxième récolte. (WSB : stress hydrique en début de culture, WSC, stress hydrique continu ; WSE : stress hydrique en fin de culture ; WW : plantes témoins bien arrosées (100% FC)).

		Récolte 1			Récolte 2				
		WW	WSC	Anova 1	WW	WSC	WSB	WSE	Anova 1
Poids frais [g]	Feuilles	14.28 ± 4.42	14.94 ± 0.76	$F_{1,4} = 0.065$ $P = 0.812$	8.37 ± 3.54	14.46 ± 4.44	10.6 ± 1.52	5.06 ± 2.27	$F_{3,8} = 4.703$ $P = 0.0355$
	Tiges	19.9 ± 7.60	16.04 ± 1.73	$F_{1,4} = 0.736$ $P = 0.439$	15.79 ± 10.36	21.89 ± 10.22	29.64 ± 3.47	19.61 ± 1.93	$F_{3,8} = 1.8$ $P = 0.225$
	Inflorescences	0.78 ± 0.30	0.66 ± 0.33	$F_{1,4} = 0.202$ $P = 0.677$	4.08 ± 1.21	5.44 ± 2.50	7.47 ± 0.94	4.38 ± 0.31	$F_{3,8} = 3.229$ $P = 0.0821$
	Poids frais total [g]	34.96 ± 12.03	31.64 ± 2.50	$F_{1,4} = 0.209$ $P = 0.671$	28.25 ± 10.46	41.79 ± 14.18	47.7 ± 3.82	29.06 ± 3.34	$F_{3,8} = 3.294$ $P = 0.0789$
Poids sec [g]	Feuilles	1.68 ± 0.61	1.55 ± 0.16	$F_{1,4} = 0.133$ $P = 0.734$	2.46 ± 2.74	1.80 ± 0.99	1.66 ± 0.22	0.81 ± 0.27	$F_{3,8} = 0.645$ $P = 0.608$
	Tiges	2.26 ± 0.75	1.12 ± 0.40	$F_{1,4} = 5.418$ $P = 0.0805$	2.40 ± 0.72	3.41 ± 2.58	5.11 ± 0.66	3.36 ± 0.32	$F_{3,8} = 1.983$ $P = 0.195$
	Inflorescences	0.16 ± 0.065	0.12 ± 0.074	$F_{1,4} = 0.492$ $P = 0.522$	2.81 ± 0.92	3.21 ± 1.87	4.46 ± 0.55	2.93 ± 0.17	$F_{3,8} = 1.48$ $P = 0.292$
	Poids sec total [g]	4.10 ± 1.42	2.79 ± 0.62	$F_{1,4} = 2.154$ $P = 0.216$	7.67 ± 3.02	8.42 ± 4.37	11.24 ± 1.13	7.10 ± 0.54	$F_{3,8} = 1.497$ $P = 0.288$
Teneur en eau [%]	Feuilles	88.33 ± 0.64	89.63 ± 0.96	$F_{1,4} = 3.751$ $P = 0.125$	69.83 ± 29.41	87.96 ± 3.63	84.29 ± 0.31	83.58 ± 2.26	$F_{3,8} = 0.86$ $P = 0.5$
	Tiges	88.51 ± 0.66	93.11 ± 1.98	$F_{1,4} = 14.51$ $P = 0.019$	76.7 ± 18.61	85.67 ± 4.53	82.77 ± 0.73	84.53 ± 3.26	$F_{3,8} = 0.506$ $P = 0.689$
	Inflorescences	78.98 ± 0.285	81.9 ± 1.919	$F_{1,4} = 6.767$ $P = 0.06$	31.9 ± 3.89	44.06 ± 10.99	40.18 ± 1.32	33.07 ± 4.38	$F_{3,8} = 2.573$ $P = 0.127$
	Teneur en eau totale [%]	88.24 ± 0.34	91.22 ± 1.54	$F_{1,4} = 10.68$ $P = 0.031$	73.05 ± 2.07	80.25 ± 6.61	76.46 ± 0.90	76.52 ± 3.36	$F_{3,8} = 1.729$ $P = 0.238$
Indice de récolte [%] *					37,27%	38,36%	39,69%	41,33%	$F_{3,8} = 0.098$ $P = 0.959$
Indice de tolérance [%] **		68%			110%		147%	88%	

$$* \left[\frac{\text{Poids sec inflorescences}}{\text{Poids sec total}} \right] \times 100$$

$$** \left[\frac{\text{Poids sec total}}{\text{Poids sec total condition témoin WW}} \right] \times 100$$

L'indice de récolte mesure le ratio entre le poids sec des inflorescences et le poids sec total pour chaque condition de traitement (Tableau 4). Cet indice nous fournit une information sur la production de graines de la plante par rapport à son poids sec total. Les plantes en condition de stress à la fin de la croissance ont l'indice de récolte le plus élevé, suivi de celles en condition de stress au début et en continu. Les plantes en condition témoin ont l'indice de récolte le plus bas. Cependant, il n'y a pas de différence significative entre les différentes conditions de traitement ($F_{3,8} = 0.098$ et $P = 0.959$).

Un indice de tolérance a pu être calculé sur base des poids secs totaux des différentes conditions de stress, WSC, WSB et WSE, comparé au poids sec total des plantes en condition WW (Tableau 4). L'indice de tolérance fournit une information sur la capacité des plantes, qui ont subi un stress hydrique à un quelconque moment de leur croissance, à produire de la biomasse. À la première récolte, les plantes en conditions stressées (WSC) ont produit l'équivalent de seulement 68% de la biomasse produite par les plantes en condition témoin, WW.

À la deuxième récolte, on observe que, comparé à la biomasse finale produite par les plantes en condition WW, les plantes en condition WSC ont produit nettement plus de biomasse, avec un indice de tolérance de 147% suivi par les plantes en condition WSB qui ont produit l'équivalent de 110% de la biomasse des plantes en condition WW. Les plantes en condition WSE ont quant à elles un indice de tolérance de 88%, indiquant une production inférieure à celle des plantes en condition WW.

3. Paramètres physiologiques

3.1 Potentiel osmotique

Le potentiel osmotique des feuilles lors de la deuxième récolte ne variait pas significativement entre les différentes conditions de traitement ($F_{3,8} = 3.786$ et $P = 0.0587$, Annexe 3) et était en moyenne de -0,954 MPa (Figure 18).

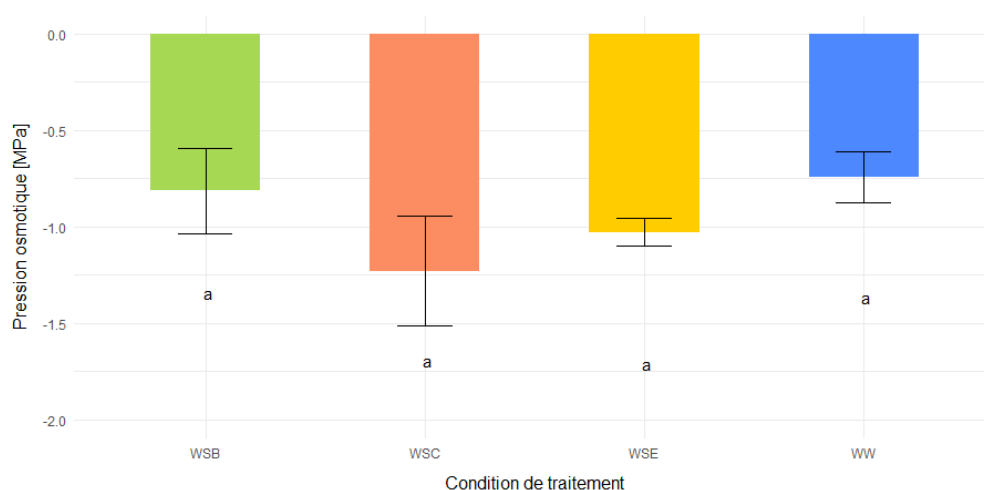


Figure 18 : Potentiel osmotique mesuré lors de la deuxième récolte en fonction des différentes conditions de traitement (WSB : stress hydrique en début de culture, WSC, stress hydrique continu ; WSE : stress hydrique en fin de culture ; WW : plantes témoins bien arrosées (100% FC)). Les conditions de traitement qui partagent une même lettre ne sont pas significativement différentes à un seuil de 5% (test de Tukey).

3.2. Teneur relative en chlorophylle

Les teneurs relatives en chlorophylle (SPAD) des feuilles mesurées lors de la deuxième récolte ne variaient pas significativement entre les différentes conditions de traitements ($F_{3,8} = 1.471$ et $P = 0.294$, Annexe 3) (Figure 19).

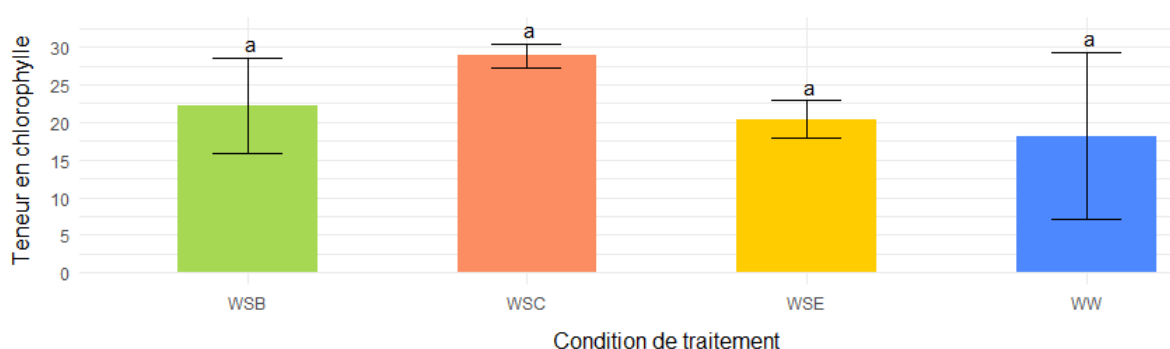


Figure 19 : Teneur relative en chlorophylle (SPAD) mesurée lors de la deuxième récolte en fonction des différentes conditions de traitement (WSB : stress hydrique en début de culture, WSC, stress hydrique continu ; WSE : stress hydrique en fin de culture ; WW : plantes témoins bien arrosées (100% FC)). Les conditions de traitement qui partagent une même lettre ne sont pas significativement différentes à un seuil de 5% (test de Tukey).

3.3. Teneurs en polyphénols et flavonoïdes

De manière générale, les concentrations totales en polyphénols ($F_{3,7} = 0.608$ et $P = 0,631$) et en flavonoïdes ($F_{3,7} = 1.874$ et $P = 0.222$) n'étaient pas significativement différentes entre les différentes conditions de traitement (Figure 20). Cependant, leurs concentrations étaient plus importantes dans les feuilles que dans les inflorescences.

Pour les polyphénols, la concentration la plus élevée a été obtenue dans les feuilles des plantes en conditions WSE, avec une concentration moyenne de $9,19 \pm 3,47$ mg/g de MF, suivie de près par les plantes en condition WW, avec une concentration moyenne de $8,54 \pm 4,72$ mg/g de MF. Les plantes en condition WSB ont produit un peu moins de 30% en moins de polyphénols, comparé aux plantes en condition WSE. La concentration minimale est retrouvée dans les plantes en condition WSC avec une concentration moyenne de $4,46 \pm 2,10$ mg/g de MF. De façon générale, les concentrations en polyphénols dans les feuilles variaient fortement entre les plantes au sein d'un même traitement, surtout pour le traitement WW, ce qui explique sans doute que les différences entre traitements n'étaient pas significatives. En ce qui concerne les concentrations en polyphénols dans les inflorescences, celles-ci étaient très similaires pour les différents traitements. Elles étaient légèrement plus importantes dans les inflorescences des plantes en condition WSB et WSC qu'en condition WSE et WW, ce qui montre une tendance inverse par rapport aux feuilles (Annexe 3).

Concernant les concentrations en flavonoïdes, bien que les concentrations soient plus élevées dans les feuilles que dans les inflorescences, la différence entre les feuilles et les inflorescences n'était pas aussi marquée que pour les polyphénols et dépendait des traitements. En effet, les concentrations en flavonoïdes dans les feuilles étaient plus élevées que dans les inflorescences pour les plantes en condition WSB et WSE. En revanche, pour les plantes en condition WW et WSC, les concentrations en flavonoïdes étaient pratiquement égales dans les feuilles et les inflorescences (Annexe 3).

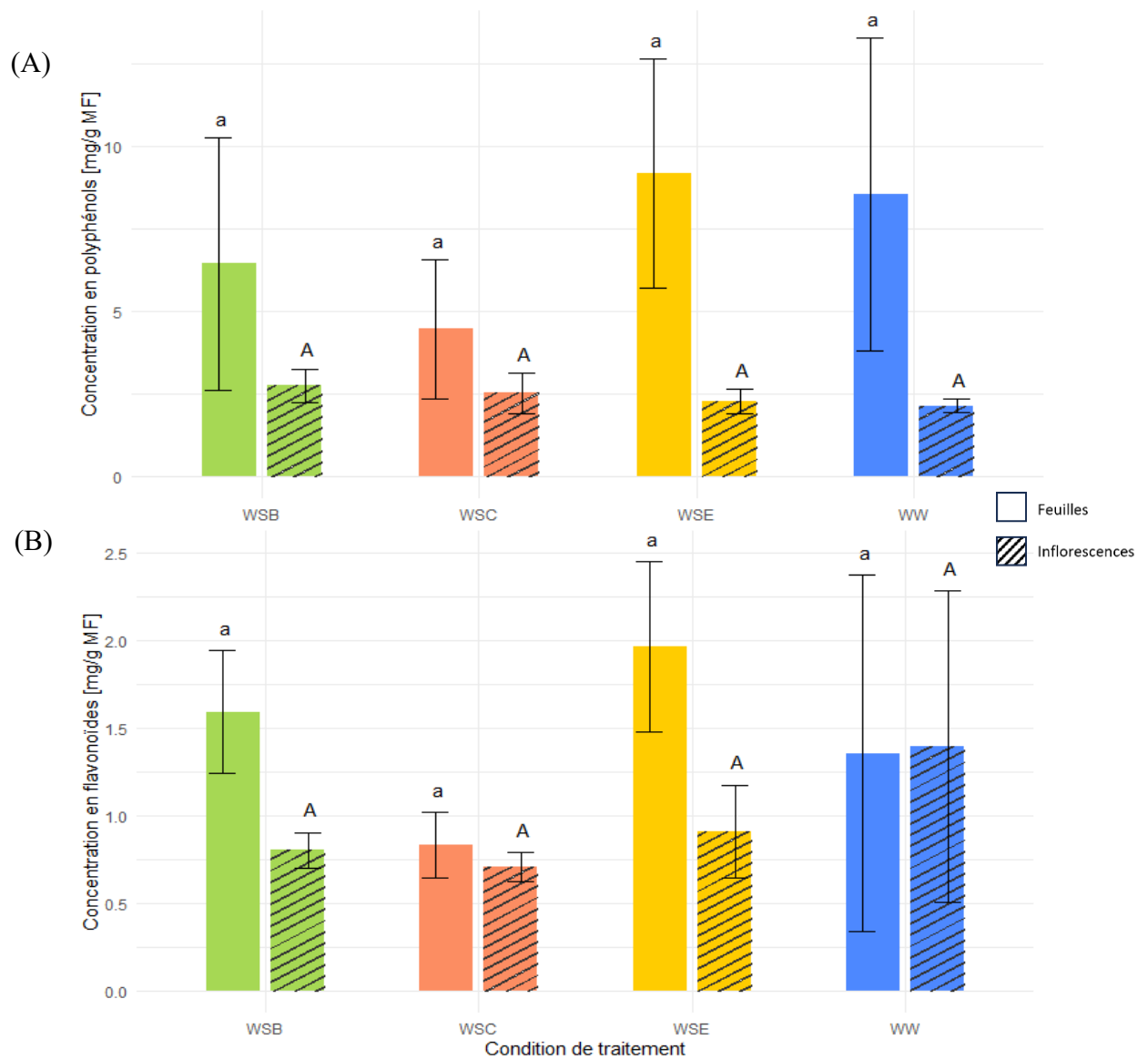


Figure 20 : (A) Concentration en polyphénols dans les feuilles (couleur pleine) et dans les inflorescences (hachuré) [mg/g MF] et (B) Concentration en flavonoïdes dans les feuilles (couleur pleine) et dans les inflorescences (hachuré) [mg/g de MF] en fonction des différentes conditions de traitement (WSB : stress hydrique en début de culture, WSC, stress hydrique continu ; WSE : stress hydrique en fin de culture ; WW : plantes témoins bien arrosées (100% FC)). Les valeurs présentant une même lettre pour un même organe ne sont pas significativement différentes selon le test de Tukey.

4. Paramètres de rendements et qualité des graines

4.1. Poids de 1000 graines

Les poids de 1000 grains pour les plantes en condition WSB, WSC, WSE et WW étaient respectivement de $16,3 \pm 0,386$ g, $15,1 \pm 0,681$ g, $15,9 \pm 0,382$ g et $16,9 \pm 0,488$ g (Annexe 3). Le poids de 1000 graines variait significativement en fonction de la condition de traitement ($F_{3,8} = 7.309$ et $P = 0.0111$) (Figure 21). Le poids de 1000 grains pour les plantes en condition WW est significativement plus élevé que celui des plantes en condition WSC, tandis que les plantes en condition WSB et WSE ont un poids de 1000 grains intermédiaire qui est similaire.

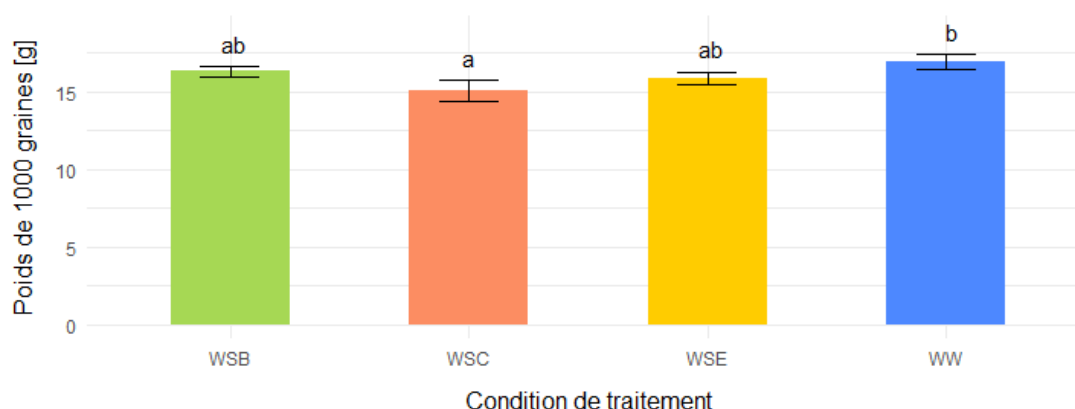


Figure 21 : Poids de 1000 grains [g] en fonction des différentes conditions de traitement (WSB : stress hydrique en début de culture, WSC, stress hydrique continu ; WSE : stress hydrique en fin de culture ; WW : plantes témoins bien arrosées (100% FC)). Les valeurs présentant une même lettre pour un même organe ne sont pas significativement différentes selon le test de Tukey.

4.2. Teneurs en protéines

Les concentrations en protéines des graines récoltées durant la deuxième récolte étaient significativement différentes entre les différentes conditions de traitement appliquées ($F_{3,8} = 40.7$ et $P = 3.43 \cdot 10^{-5}$, Tableau 5). Les concentrations maximales ont été mesurées dans les plantes en condition WW, avec des concentrations allant jusqu'à 12,36 mg par gramme de matière fraîche, suivies par les plantes en condition WSC. Le test de Tukey réalisé montre une différence significative entre ces deux conditions (Tableau 5). Les plantes en condition de traitement intermédiaire, WSB et WSE, avaient une teneur en protéines des graines significativement différente des conditions WW et WSC, mais n'étaient pas significativement différentes entre elles (Tableau 5). Les concentrations minimales ont été mesurées dans les plantes en condition WSB avec un seuil minimum de 8,79 mg de protéines par gramme de matière fraîche.

Tableau 5 : Concentration en protéines [mg/g MF] mesurée dans les feuilles récoltées durant la deuxième récolte et placées à l'étuve à 30°C, en fonction des différentes conditions de traitement (WSB : stress hydrique en début de culture, WSC, stress hydrique continu ; WSE : stress hydrique en fin de culture ; WW : plantes témoins bien arrosées (100% FC)).

	Concentration en protéines [mg/g MF] à la deuxième récolte *	
WSB	9.25 ± 0.40	a
WSC	11.18 ± 0.49	b
WSE	10.08 ± 0.05	a
WW	12.09 ± 0.23	c
Anova 1	Traitements	$F_{3,8} = 40.7$ $P = 3.43 \times 10^{-05}$

* Les conditions de traitement qui partagent une même lettre ne sont significativement pas différentes à un seuil de 5% (test de Tukey)

4.3. Teneurs en sucres solubles

Les concentrations en sucres solubles mesurées dans les graines récoltées à la deuxième récolte et mises à l'étuve à 30°C étaient légèrement différentes en fonction de la condition de traitement appliquée aux plantes ($F_{3,8} = 6.182$ et $P = 0,0177$, Tableau 6).

Les concentrations les plus élevées ont été observées dans les graines des plantes en condition WSC et WSE, avec en moyenne 8,75 mg de sucres solubles par gramme de matière fraîche. Les graines des plantes en condition WSB contenaient quant à elles moins de sucres solubles, avec en moyenne $7,38 \pm 0,56$ mg de sucres solubles par gramme de matière fraîche. Les concentrations en sucres solubles dans les graines des plantes en condition WW étaient intermédiaires entre les concentrations des plantes en WSB et celles des plantes en conditions WSC et WSE.

Tableau 6 : Concentration en sucres solubles [mg/g MF] mesurée dans les feuilles récoltées à la deuxième récolte et placées à l'étuve à 30°C, en fonction des différentes conditions de traitement (WSB : stress hydrique en début de culture, WSC, stress hydrique continu ; WSE : stress hydrique en fin de culture ; WW : plantes témoins bien arrosées (100% FC)).

	Concentration en sucres solubles [mg/g MF] à la deuxième récolte *	
WSB	7.38 ± 0.56	a
WSC	8.76 ± 0.07	b
WSE	8.74 ± 0.75	b
WW	7.84 ± 0.17	ab
Anova 1	Traitements	$F_{3,8} = 6.182$ $P = 0.0177$

* Les conditions de traitement qui partagent une même lettre ne sont significativement pas différentes à un seuil de 5% (test de Tukey)

4.4. Teneurs en minéraux

Le potassium et le magnésium sont les minéraux retrouvés en concentration les plus élevées dans les graines du sarrasin de Tartarie, avec des concentrations moyennes atteignant les 4,53 mg et 1,8 mg respectivement par gramme de matière fraîche (Tableau 7). Le cuivre est retrouvé en concentration la plus faible, avec une concentration moyenne de 5 µg par gramme de matière fraîche. Le reste des minéraux (sodium, calcium, fer, zinc) étaient présents dans des concentrations intermédiaires. Aucune différence significative n'a été observée entre traitements pour la teneur en minéraux des graines.

Tableau 7 : Concentrations en minéraux [mg/g ou µg/g de MF] mesurées dans les graines récoltées à la deuxième récolte placées à l'étuve à 30°C, pour les différentes conditions de traitement (WSB : stress hydrique en début de culture, WSC, stress hydrique continu ; WSE : stress hydrique en fin de culture ; WW : plantes témoins bien arrosées (100% FC)).

	Concentration en minéraux dans les graines				
	WW	WSC	WSB	WSE	Anova 1
Sodium [µg/g MF]	64.08 ± 5.85 a	108.3 ± 32.04 a	69.23 ± 3.75 a	118.1 ± 77.3 a	$F_{3,8} = 1.264$ P = 0.35
Magnésium [mg/g MF]	1.78 ± 0.071 a	1.71 ± 0.28 a	1.76 ± 0.069 a	1.82 ± 0.056 a	$F_{3,8} = 0.301$ P = 0.824
Potassium [mg/g MF]	4.55 ± 0.58 a	4.23 ± 0.88 a	4.55 ± 0.78 a	4.79 ± 0.15 a	$F_{3,8} = 0.362$ P = 0.782
Fer [µg/g MF]	56.4 ± 12.37 a	80.2 ± 31.1 a	61.72 ± 9.079 a	83.6 ± 4.80 a	$F_{3,8} = 1.766$ P = 0.231
Calcium [µg/g MF]	262.5 ± 47.27 a	191.8 ± 69.84 a	250.4 ± 85.08 a	260.7 ± 45.87 a	$F_{3,8} = 0.817$ P = 0.52
Cuivre [µg/g MF]	3.97 ± 2.33 a	3.76 ± 4.11 a	5.70 ± 1.79 a	4.83 ± 2.41 a	$F_{3,8} = 0.3$ P = 0.824
Zinc [µg/g MF]	86.66 ± 21.98 a	80.54 ± 5.36 a	92.35 ± 13.61 a	75.47 ± 17.29 a	$F_{3,8} = 0.648$ P = 0.606

* Les conditions de traitement qui partagent une même lettre ne sont significativement pas différentes à un seuil de 5% (test de Tukey)

V. Discussion

1. *Quels sont les impacts d'un stress hydrique sur la croissance et la physiologie du sarrasin de Tartarie ?*

Pour répondre à cette question, une comparaison du développement morphologique des plantes mises en stress hydrique à différents moments de leur croissance sera tout d'abord réalisée et comparée aux plantes témoins. Ensuite, une analyse des différences physiologiques sera réalisée afin de comprendre les stratégies mises en place par le sarrasin de Tartarie face à un stress hydrique.

Il existe trois stratégies de résistance au stress hydrique chez les plantes : 1) La stratégie de fuite basée sur l'adaptation du cycle de vie de la plante afin d'éviter la pénurie en eau ; 2) la stratégie d'évitement grâce au maintien du potentiel hydrique et d'une économie en eau afin d'empêcher la déshydratation ; et finalement, 3) la stratégie de tolérance, mise en place par les plantes capables de supporter un faible potentiel hydrique et qui maintiennent leur croissance végétative même lorsqu'elles sont en stress hydrique (Aroca, 2012). De nombreuses études réalisées sur la résistance du sarrasin de Tartarie à un stress hydrique s'accordent pour dire que le sarrasin de Tartarie développe des mécanismes de tolérance à la sécheresse, contrairement au sarrasin commun qui présente des mécanismes d'évitement de la sécheresse (Aubert and Quinet, 2022; He et al., 2024; Jha et al., 2024; Roychoudhury et al., 2022). Les mécanismes de tolérance mis en place par le sarrasin de Tartarie seraient le maintien de la croissance végétative et de la reproduction ainsi que l'augmentation de la production en composés tels que les antioxydants qui permettent aux plantes de s'adapter et de résister notamment au stress oxydatif (Aubert et al., 2021b). Nos résultats montrent également que le sarrasin de Tartarie maintient sa croissance en cas de stress hydrique.

La plupart des études sur la résistance du sarrasin de Tartarie au stress hydrique se sont intéressées à l'impact d'un stress continu en comparant deux conditions de traitement : un stress continu et une condition contrôle, chacun durant toute la durée de l'expérience (Aubert et al., 2021a; Aubert and Quinet, 2022; He et al., 2024; Meng et al., 2022). Cependant, il est bien connu que la sensibilité des plantes au stress n'est pas la même en fonction du stade de développement et que les effets d'un stress continu et de stress ponctuels peuvent différer (Seleiman et al., 2021). De même, la phase de récupération suivant un stress hydrique est également importante à prendre en compte (Abid et al., 2016). Dans cette étude, nous avons comparé l'impact d'un stress hydrique appliqué en continu ou à différents moments de la croissance du sarrasin de Tartarie. Nos résultats montrent une différence de comportement en fonction du moment d'application du stress.

De manière générale, les plantes en stress hydrique continu et celles qui ont été stressées en début de croissance (WSC et WSB) avaient un développement globalement plus important que les plantes témoins et les plantes stressées durant la floraison (WW et WSE).

La différence la plus marquée concernait le nombre de feuilles et d'inflorescences produites en fin de culture. En effet, les plantes en condition WSC et WSB ont développé significativement plus de feuilles et d'inflorescences que les plantes en condition WW et WSE. Ceci suggère que les plantes soumises à un stress hydrique précoce ont stimulé leur croissance comparativement aux plantes bien arrosées en début de traitement. Cette augmentation du nombre de feuilles chez les plantes stressées est inhabituelle. En effet, un manque d'eau chez les plantes provoque généralement une limitation de la division et de l'élongation des cellules, produisant ainsi moins de feuilles (Gray and Brady, 2016; Schuppler et al., 1998). Aubert et Quinet (2022) ont observé que l'impact du stress hydrique sur la production foliaire dépendait de la variété chez le sarrasin de Tartarie et que la variété Zlata était peu affectée à ce niveau. Par ailleurs, ces auteurs ont observé que le stress hydrique diminuait la surface foliaire individuelle des feuilles chez le sarrasin de Tartarie, mais ce paramètre n'a pas été mesuré dans ce travail. De même, le stress hydrique a généralement tendance à diminuer la production d'inflorescences et de fleurs (Höfer et al., 2023). Dans leur étude, Aubert et al. (2020) ont observé une diminution de la production des inflorescences chez le sarrasin de Tartarie var. Zlata suite au stress hydrique, mais aucune différence significative n'a été observée pour cette même variété dans l'étude de Aubert et Quinet (2022). Une telle différence peut être expliquée par une intensité de stress hydrique plus importante lors de l'étude d'Aubert et al. (2020) (arrosage toutes les 2 semaines) que dans celle d'Aubert et Quinet (2022) ou que dans notre travail.

Une autre différence marquante entre nos résultats et ceux obtenus précédemment sur le sarrasin de Tartarie concerne la taille des plantes. En effet, He et al. (2024) et Aubert et Quinet (2022) ont observé que le stress hydrique diminuait la taille des plantes, ce qui n'était pas le cas dans ce travail. Il est cependant à noter que la réduction de taille suite au stress hydrique était moins marquée chez la variété Zlata que chez la majorité des 12 variétés analysées dans l'étude d'Aubert et Quinet (2022), ceci suggère que la variété Zlata est assez résistante au stress hydrique comparée à d'autres variétés de sarrasin de Tartarie. Il n'est pas exclu que dans l'étude d'Aubert et Quinet (2022), les plantes soumises au stress hydrique avaient un retard de croissance comparativement aux plantes témoins, comme le suggère l'allure des graphes d'évolution du nombre de feuilles qui atteignaient plus rapidement un plateau en condition témoin qu'en stress hydrique. Ceci pourrait partiellement expliquer les différences observées concernant la hauteur des plantes. Cependant, un tel retard de croissance n'a pas été mis en évidence dans notre travail. En effet, les courbes d'évolution du nombre de feuilles et d'inflorescences suivaient la même tendance globale pour chacun des traitements sur toute la durée de l'expérience. Les plantes en conditions de stress ne présentaient donc pas d'adaptation quelconque de leur cycle de vie en fonction de leur stress, ce qui suggère que les plantes n'ont pas développé de stratégie de fuite en réponse au stress hydrique afin d'accélérer leur cycle de développement et ainsi échapper au stress hydrique.

La stratégie d'évitement pourrait être une stratégie mise en place par le sarrasin de Tartarie au début du stress hydrique. En effet, on constate sur la figure 10 qu'il a fallu attendre 14 jours

après la mise en place du traitement avant de mesurer une teneur en eau inférieure à 20% dans la terre chez les plantes stressées. De plus, lors de la mesure des poids secs à la première récolte, les plantes en condition WW avaient une biomasse légèrement plus importante que celles en condition WSC (bien que non significative), probablement afin de réduire les pertes en eau dues à la transpiration. Nous n'avons malheureusement pas pu suivre la transpiration au cours du temps dans cette étude et l'étude de Aubert et al. (2020) montre que les plantes ont maintenu leur transpiration malgré le stress hydrique, mais cette mesure a été faite 6 semaines après le début du stress et ne permet donc pas d'observer l'effet d'un stress précoce. Si une baisse de croissance est suggérée en début de stress hydrique, les différences ne sont rapidement plus visibles à partir du 34^{ième} jour de traitement, date après laquelle les plantes en condition WSC et WSB deviennent plus performantes que celles en condition WSE et WW. Cela suggère qu'une stratégie de tolérance est mise en place par le sarrasin de Tartarie, comme mentionné par les études trouvées dans la littérature (Aubert and Quinet, 2022; He et al., 2024; Jha et al., 2024; Roychoudhury et al., 2022). En effet, malgré les conditions de stress, les plantes de chaque traitement ont maintenu leur croissance végétative et leur reproduction. Nos résultats montrent également que les plantes ont maintenu leur teneur en eau en réponse au stress hydrique, comme observé précédemment par Aubert et al. (2020) et Aubert et Quinet (2022).

Bien que la biomasse totale des plantes soit peu affectée par le stress hydrique, nos résultats montrent une différence d'allocation des ressources en fonction des organes selon le moment d'application du stress. En effet, si les plantes en condition WW ont une biomasse équilibrée entre les feuilles, les tiges et les inflorescences, les plantes soumises à un stress hydrique montrent une répartition de la biomasse plus importante pour les tiges et les inflorescences que pour les feuilles. Cet effet est plus marqué chez les plantes ayant subi un stress hydrique en début ou fin de culture plutôt qu'un stress continu. Ceci suggérerait que lors d'un stress hydrique les plantes allouent plus de ressources vers les tiges et les structures reproductrices que vers les feuilles. L'hypothèse de la sénescence précoce des feuilles en cas de stress hydrique est écartée étant donné que le nombre final de feuilles en fin d'expérience était supérieur pour les plantes ayant subi un stress comparé aux plantes témoins. Une explication pourrait être la diminution de la surface foliaire produite en cas de stress hydrique comparée aux plantes en condition WW qui produisent moins de feuilles, mais avec des surfaces foliaires plus élevées. Cette hypothèse est appuyée par l'étude réalisée par Aubert et al. (2021) sur la même variété de sarrasin de Tartarie et qui montre une diminution de surface foliaire en cas de stress hydrique. Pour confirmer cette hypothèse, il aurait été intéressant de mesurer la surface foliaire des feuilles lors de cette étude. Une diminution de la surface foliaire permet de limiter la surface transpirante et est une réponse généralement observée chez les plantes en réponse au stress hydrique (Koch et al., 2019). Une autre stratégie d'adaptation communément observée en cas de stress hydrique est une augmentation de la croissance racinaire et une allocation des ressources plus importante vers les racines (Franco, 2011; Ye et al., 2018). Cependant, selon He et al. (2024), un déficit hydrique modéré à sévère pourrait causer de sérieux dommages au niveau des racines du sarrasin de Tartarie, en réduisant sa capacité d'absorption d'eau et de

nutriments. Une étude sur le développement racinaire du sarrasin de Tartarie à différentes périodes de sécheresse pourrait être intéressante pour améliorer la compréhension du mécanisme de tolérance au stress hydrique de celui-ci.

Pour mieux comprendre l'impact du stress sur la croissance des plantes, il est important de s'intéresser à la photosynthèse. Généralement, le taux de photosynthèse diminue proportionnellement au contenu relatif en eau et au potentiel hydrique des feuilles (Reddy et al., 2004). De manière générale, la sécheresse impacte principalement la photosynthèse par la fermeture des stomates, ce qui entraîne la diminution de la photosynthèse nette et de la concentration en CO₂ interne (Reddy et al., 2004). Ces mesures n'ont pas été réalisées dans le cadre de ce travail, mais l'étude d'Aubert et al. (2021) n'a montré aucun impact d'un stress hydrique sur la photosynthèse du sarrasin de Tartarie, à l'exception d'une teneur en chlorophylle plus importante pour les plantes en condition de stress. La teneur en chlorophylle donne une information sur le maintien de la phase claire de la photosynthèse (Xiang et al., 2019). Le stress hydrique n'a pas significativement impacté la teneur en chlorophylle des feuilles dans notre étude. Cependant, le contenu en chlorophylle était proportionnel à la production de feuilles dans les différentes conditions. En effet, les plantes en condition WSC avaient une teneur en chlorophylle légèrement plus importante que celle mesurée chez les plantes en condition WW. Selon Aubert et al. (2021), cette augmentation de l'indice de teneur en chlorophylle dans les plantes stressées pourrait être due à un effet de concentration étant donné la diminution de la surface foliaire. Par contre, Xiang et al. (2013) ont observé que les plantes de sarrasin soumises à une sécheresse au début de leur phase de floraison avaient une teneur en chlorophylle qui diminuait, mais nous n'avons pas d'information sur la surface foliaire des feuilles dans cette étude. En tout cas, nos résultats montrent que ce paramètre n'est pas négativement affecté par le stress hydrique, quel que soit le moment d'application.

Une autre stratégie de résistance mise en place par les plantes tolérantes au stress hydrique telles que le sarrasin de Tartarie vient d'un ajustement osmotique et d'une augmentation de la production d'antioxydants (Aubert et al., 2021b; Bohnert and Jensen, 1996; Meng et al., 2022; Reddy et al., 2004). Le potentiel osmotique n'était pas significativement affecté par le stress hydrique dans notre étude, bien qu'il fût légèrement plus faible pour les plantes WSC que pour les plantes WW, les deux autres traitements (WSB et WSE) ayant un potentiel osmotique intermédiaire. Ceci suggère que les plantes en stress hydrique ont pu mettre en place un ajustement osmotique, bien que nous n'ayons pas analysé l'accumulation d'osmolytes pour le confirmer. Nous n'avons pas non plus observé de modification significative des teneurs en polyphénols et flavonoïdes dans les feuilles en réponse au stress, bien que leur concentration était légèrement plus basse chez les plantes WSC que pour les autres traitements.

Meng et al. (2022) ont étudié les réponses morphologiques et physiologiques des variétés tolérantes à une sécheresse du sarrasin de Tartarie comparé aux génotypes sensibles. Les plantes tolérantes présentaient un nombre de feuilles plus élevé avec un flétrissement plus lent ainsi qu'une accumulation plus importante et plus rapide de substances protectrices telles que la

proline, les polyamines, les sucres solubles et les protéines solubles (Meng et al., 2022; Roychoudhury et al., 2022). De plus, les variétés tolérantes avaient un contenu plus faible en malondialdéhyde (MDA) en conditions de stress, ce qui reflète qu'il y avait peu de stress oxydatif (Meng et al., 2022)

L'accumulation de solutés (proline, sucres solubles, protéines solubles...) en condition de sécheresse permet de réduire le potentiel hydrique sans diminuer la teneur en eau, permettant ainsi un ajustement osmotique (He et al., 2024, Bohnert and Jensen, 1996; Meng et al., 2022; Roychoudhury et al., 2022). En plus de maintenir la pression de turgescence dans les cellules, certains solutés comme la proline et les antioxydants protègent les enzymes et les macromolécules des effets néfastes des ROS (Reactive Oxygen Species) (Aroca, 2012; Bohnert and Jensen, 1996). Une augmentation de proline en cas de stress hydrique a été observée chez le sarrasin de Tartarie dans plusieurs études (Aroca, 2012; Aubert et al., 2021b; Meng et al., 2022). Les principaux antioxydants retrouvés chez le sarrasin de Tartarie sont les polyphénols et les flavonoïdes et leurs teneurs sont un bon indice de degré de résistance à la sécheresse (Reddy et al., 2004). Les études d'Aubert et al. (2021) et de Meng et al. (2022) ont rapporté une augmentation des concentrations en polyphénols et en flavonoïdes en cas de stress hydrique, ce qui diffère de nos observations. Il est possible qu'il n'y ait pas eu de stress oxydatif dans les feuilles en réponse au stress hydrique dans notre étude, ce qui n'a donc pas nécessité une augmentation des teneurs en antioxydants. Nos résultats suggèrent cependant que la teneur en polyphénols et flavonoïdes était plus élevée pour les plantes ayant subi un stress court comparativement aux plantes en stress continu. Laxa et al. (2019) apportent que les antioxydants jouent également un rôle clé dans la récupération suite à un stress hydrique, ce qui pourrait être le cas dans notre étude.

De nombreuses études ont montré que la phase végétative du sarrasin était moins affectée par un stress hydrique comparé à la phase reproductive (Aubert and Quinet, 2022; Jacquemart et al., 2012; Meng et al., 2022). Chez le sarrasin commun, une sécheresse durant la phase végétative ou en fin de floraison est moins préjudiciable que durant le début de la phase reproductive (Roychoudhury et al., 2022). Nos résultats montrent également des différences en fonction du moment d'application du stress hydrique pour certains paramètres chez le sarrasin de Tartarie. Une hypothèse pourrait être que les plantes soumises à un stress hydrique durant la phase végétative ont dû mettre en place plus de mécanismes de résistance pour réduire l'impact du stress hydrique sur leur croissance végétative et maintiendraient donc mieux leur croissance que les plantes soumises à un stress hydrique durant la floraison ; tandis que les plantes soumises à un stress hydrique plus tard seraient plus sujettes à des stress secondaires comme le stress oxydatif et donc synthétiseraient plus de composés de défense comme des antioxydants. Nos résultats montrent également que les plantes en stress continu ont une meilleure croissance et une meilleure réponse au stress que les plantes stressées seulement à un certain moment de leur croissance. Ce résultat pourrait être lié à la stratégie de tolérance mise en place par le sarrasin de Tartarie face à un stress hydrique. Les plantes qui subissent un stress en continu pourraient avoir une meilleure tolérance à la sécheresse, probablement grâce à leur stratégie de

maintien du potentiel hydrique maintenu en continu, les rendant plus performantes sur le long terme. Les plantes en conditions de stress périodiques sont quant à elles soumises à des conditions instables au cours du temps, pouvant altérer les mécanismes de tolérance qu'elles mettent en place. En effet, la phase de récupération nécessite la mise en place de nouvelles stratégies et la capacité de récupération peut dépendre du stade de développement et du génotype (Abid et al., 2016). Il est cependant à noter que l'augmentation de croissance observée dans cette étude pour les plantes en condition WSC reste surprenante au regard des autres études menées sur le sarrasin de Tartarie qui, au mieux, ne montrent pas d'effets (He et al., 2024 ; Roychoudhury et al., 2022). Ceci pourrait être expliqué par une différence dans les intensités de stress appliquées ou par le fait que dans la plupart des études, le stress est appliqué durant la phase reproductive. En effet, le sarrasin réalise sa transition florale très tôt, 15-20 jours après le semis, quand seules les premières feuilles sont macroscopiquement visibles (Quinet et al. 2004). La réponse au stress hydrique est en effet complexe et les résultats obtenus d'une étude à l'autre peuvent parfois sembler contradictoires. Plusieurs études montrent qu'il est difficile de généraliser son effet vu la diversité des modes d'applications utilisées, les variations entre espèces ou génotypes et entre stades de développement (Bertoli et al., 2013; Descamps et al., 2021). Il ressort cependant de notre étude que le sarrasin de Tartarie et la variété Zlata en particulier est assez résistant au stress hydrique, ce qui confirme les résultats obtenus dans d'autres études (Aubert et al., 2021 ; Aubert and Quinet, 2022; He et al., 2024; Roychoudhury et al., 2022).

2. *Quel est l'impact d'un stress hydrique sur le rendement et la qualité des graines chez le sarrasin de Tartarie ?*

Le sarrasin de Tartarie est connu pour sa capacité d'adaptation à son environnement et sa résilience face aux stress environnementaux (He et al., 2024; Jha et al., 2024) mais qu'en est-il des impacts sur son rendement et la qualité nutritionnelle de ses graines ? Pour répondre à cette question, une comparaison des rendements et des concentrations en protéines, en sucres solubles, en minéraux et en antioxydants des graines a été réalisée entre les différentes conditions de traitement dans ce mémoire.

Concernant les paramètres de rendement, nos résultats ont montré que le stress hydrique n'a pas affecté le poids sec des inflorescences en graines par plante ni l'indice de récolte. Par contre, le stress hydrique a légèrement diminué le poids de 1000 grains ; cette diminution était plus importante lorsque le stress hydrique était appliqué durant toute la croissance de la plante que lorsqu'il était appliqué en début ou en fin de la croissance uniquement. Aubert et Quinet (2022) ont également observé une diminution du nombre de grains par plante et du poids de 1000 grains en cas de stress hydrique continu chez le sarrasin de Tartarie, bien que cette diminution était moins marquée chez la variété Zlata comparativement aux autres variétés testées. Ceci suggère que la variété Zlata serait parmi les plus résistantes au stress hydrique en termes de rendement. Nous n'avons pas compté le nombre de graines par plante dans cette étude, mais étant donné que le poids des inflorescences en graines par plante n'a pas été affecté par le stress hydrique mais que par contre le poids de 1000 grains a diminué, on peut émettre l'hypothèse que les graines produites par les plantes en conditions stressées étaient plus nombreuses mais plus petites et avec un moins bon remplissage de la graine que celles des plantes en condition témoin. Il faut cependant rester prudent étant donné que le poids sec des inflorescences en graines a été pris après séchage à l'étuve à 60°C tandis que les poids de 1000 grains ont été calculés grâce aux graines mises à l'étuve à 30°C permettant ainsi de conserver la matière fraîche de la graine. Peu d'études se sont intéressées à l'impact d'un stress hydrique sur les paramètres de rendement chez le sarrasin de Tartarie mais il est connu que le stress hydrique peut diminuer les paramètres de rendement chez les cultures à graines comme les céréales et les légumineuses (Daryanto et al., 2015; Gámez et al., 2019; Silva et al., 2020; Wan et al., 2022; Zhang et al., 2018). Une étude réalisée par Silva et al. (2020), qui s'est intéressée à l'impact d'un stress hydrique sur la productivité et la qualité des graines chez différentes variétés de triticale, de blé et de haricots, montre qu'un déficit hydrique réduit le rendement pour les trois cultures étudiées. Cependant, l'impact du stress hydrique peut dépendre de l'espèce, du génotype, de l'intensité du stress et de son moment d'application. En effet, Silva et al. (2020) ont montré que la productivité des variétés tolérantes de blé n'était pas impactée par le stress hydrique, contrairement aux cultures de triticale et de haricots dont la productivité diminuait en cas de stress hydrique. Les effets du stress hydrique sur les paramètres de rendement sont aussi généralement plus marqués quand le stress apparaît durant la phase reproductive que durant la phase végétative (Daryanto et al., 2015; Gámez et al., 2019).

Le stress hydrique a aussi affecté la qualité des graines dans notre étude, principalement les concentrations en protéines et en sucres solubles, mais n'a pas affecté les concentrations en minéraux, polyphénols et flavonoïdes. L'impact du stress hydrique sur la qualité nutritionnelle des graines a été étudié chez plusieurs espèces et, selon les études, il peut montrer un effet positif ou négatif (Li et al., 2022; Sabagh, 2019; Smith et al., 2019; Stagnari et al., 2016). Cependant, l'influence du stress hydrique sur la qualité des récoltes reste bien moins documentée que sur les paramètres de rendement (Stagnari et al., 2016).

En ce qui concerne le contenu en protéines des graines récoltées pour chaque condition de traitement, les plantes en condition témoin avaient les concentrations en protéines les plus importantes, suivies des plantes en condition de stress continu, tandis que les plantes stressées en début et en fin de culture avaient les concentrations les plus faibles. Ces résultats sont partiellement différents des teneurs mesurées par Silva et al. (2020) dans le blé et dans les haricots qui présentaient des concentrations en protéines plus élevées en cas de stress hydrique. Cependant, certaines variétés avaient des concentrations qui ne variaient pas avec le stress hydrique (Silva et al., 2020). Au contraire, Pathan et al. (2023) ont aussi observé une diminution des teneurs en protéines dans les graines en réponse au stress hydrique chez le quinoa, une autre pseudo-céréale. D'après l'étude de Thomas (2015), les quantités totales en protéines dans les grains ont tendance à baisser lors d'un stress hydrique mais cette diminution est modérée par le fait que la masse des grains diminue de manière importante, ce qui entraîne des concentrations plus élevées de protéines mesurées dans les grains. Cette affirmation semble cohérente avec les résultats obtenus dans notre étude.

D'après Thomas (2015), les concentrations en sucres dans les graines sont généralement plus impactées par un stress hydrique que les concentrations en protéines chez les céréales. Nous avons observé chez le sarrasin de Tartarie que les concentrations en sucres solubles dans les graines étaient plus élevées chez les plantes en condition de stress continu et en stress hydrique durant la phase reproductive que chez les plantes stressées durant la phase végétative et les plantes témoins. Un stress hydrique durant la phase reproductive pourrait donc avoir un impact positif sur la concentration en sucres solubles dans les graines, contrairement à un stress appliqué durant la phase végétative qui n'aurait pas d'impact sur celle-ci. Ceci diffère des observations de Silva et al. (2020) qui ont montré que les concentrations en sucres solubles dans les graines des céréales résistantes diminuaient tandis que les concentrations en protéines augmentaient en réponse à un déficit hydrique. On observe l'effet opposé dans les grains du sarrasin de Tartarie, avec une diminution des teneurs en protéines et une augmentation des teneurs en sucres solubles en cas de stress hydrique. Le sarrasin est une pseudo-céréale et pourrait donc réagir différemment que les céréales. Il serait également intéressant d'étudier la concentration en amidon en plus des sucres solubles, car l'amidon est le composant majeur des graines de sarrasin (Zhu, 2016b) et l'augmentation de sucres solubles observée pourrait être due à une dégradation de l'amidon.

En ce qui concerne les antioxydants mesurés dans les graines, les teneurs en polyphénols et en flavonoïdes n'étaient pas significativement différentes entre les différentes conditions de traitements. Ces résultats confirment les observations de Aubert et Quinet (2022) qui montrent que les concentrations en polyphénols et flavonoïdes dans les inflorescences du sarrasin de Tartarie n'étaient pas affectées par le stress hydrique. Cependant, cette même étude met en évidence que les concentrations en antioxydants étaient supérieures dans les inflorescences que dans les feuilles alors que nous avons observé l'inverse. Il est à noter que les antioxydants ont été quantifiés dans les inflorescences en fleurs chez Aubert et Quinet (2022) tandis qu'ils ont été quantifiés dans les inflorescences en graines dans notre étude et qu'il est connu que les teneurs en polyphénols et flavonoïdes sont plus faibles dans les graines que dans les fleurs chez le sarrasin (Zielińska et al., 2012).

En ce qui concerne les minéraux, les teneurs mesurées dans les graines étaient similaires quel que soit le traitement dans ce travail, contrairement à ce qui a été observé par Silva et al. (2020) chez d'autres espèces. En effet, ils ont observé une diminution des teneurs en minéraux dans les graines lors d'un stress hydrique chez le blé, le triticale et le haricot commun (Silva et al., 2020). Cette diminution était probablement due à une réduction de l'absorption des nutriments dans le sol (Silva et al., 2020). Une hypothèse qui explique cette différence pourrait être les mécanismes de tolérance à la sécheresse mis en place par le sarrasin de Tartarie qui permettent de maintenir leur potentiel hydrique et, par conséquent, de continuer l'absorption et le transport des minéraux vers leurs graines.

VI. Conclusion et perspectives

Les résultats obtenus au terme de cette étude ont permis de mettre en évidence l'impact d'un stress hydrique sur le développement, la production et la qualité nutritionnelle des graines du sarrasin de Tartarie.

D'une part, nos résultats ont confirmé la mise en place d'une stratégie de tolérance à la sécheresse par le sarrasin de Tartarie. Cette tolérance est caractérisée par un maintien de sa croissance végétative et reproductive au niveau morphologique et physiologique de la plante. En effet, le maintien du potentiel hydrique, de la teneur en chlorophylle, de l'ajustement osmotique et des teneurs en antioxydants dans les feuilles était observé chez les plantes impactées par un stress hydrique. Cependant, nos observations soulignent également des différences, bien que parfois non significatives, selon le moment d'application du stress. Les plantes en condition de stress continu et en début de croissance uniquement montrent une croissance végétative plus importante comparée aux plantes en condition de stress durant la phase reproductive. Ces résultats suggèrent que la mise en place précoce des mécanismes de tolérance par la plante est directement liée à sa résistance accrue face à la sécheresse. Cette résistance diminuerait cependant lorsque le stress est appliqué seulement périodiquement, en début ou en fin de croissance de la plante.

En ce qui concerne le rendement et la qualité nutritionnelle des graines, le stress hydrique n'a pas eu d'impact sur le poids sec des grains ni sur l'indice de récolte, mais une différence significative a cependant été observée sur les poids de 1000 grains. Ces résultats montrent l'impact d'un stress hydrique sur le remplissage des grains. En effet, des différences en termes de concentrations en protéines et en sucres solubles ont été observées dans les graines récoltées en fin d'expérience, tandis que les teneurs en minéraux et en antioxydants dans les graines n'ont pas été impactées entre les différentes conditions de traitement.

Les comparaisons des résultats obtenus dans cette étude avec ceux trouvés dans la littérature mettent en lumière l'influence de la fréquence, de l'intensité du stress ainsi que de l'environnement et de la présence d'autres stress sur les impacts d'un stress hydrique.

Cependant, ces résultats reflètent l'impact d'un stress hydrique observé sur une culture sous serre, moyennant ainsi un environnement adapté et contrôlé, ce qui ne représente pas spécialement les conditions réelles en champs. De plus, l'échantillonnage était en moyenne de 12 plantes par condition de traitement, les différences présentées ici comme non significatives pourraient s'avérer significatives en cas d'échantillons plus grands.

L'observation des impacts de la sécheresse à différents moments de la croissance est intéressante pour comprendre les mécanismes mis en place ainsi que les capacités de récupérations du sarrasin de Tartarie. Cependant, la mise en place de dosages exacts en eau lors de l'arrosage pourrait permettre de mieux différencier les conditions de traitement entre elles.

De plus, des mesures relatives à la photosynthèse, à la conductance stomatique et au développement racinaire pourraient être intéressantes pour appuyer nos résultats ainsi que l'analyse de composés tels que la proline, jouant un rôle clé dans la résistance contre la sécheresse. Finalement, il aurait été intéressant de suivre les paramètres physiologiques des plantes en différentes conditions de traitement plus régulièrement, notamment grâce à des mesures lors de la première récolte, afin de distinguer les effets relatifs au stress hydrique en cours et les effets liés à la récupération de la plante après le stress hydrique.

Cette étude met également en évidence le manque d'étude relatif à l'impact d'un stress hydrique sur le rendement et les qualités nutritionnelles du sarrasin de Tartarie.

Néanmoins, l'ensemble de ces résultats confirment que le sarrasin de Tartarie est une culture résistante et résiliente au stress hydrique, avec des avantages au niveau écologique ainsi que sur la santé humaine qui méritent plus d'attention afin de mieux intégrer cette culture dans nos rotations en Belgique.

Références bibliographiques

- Abid, M., Tian, Z., Ata-Ul-Karim, S., Wang, F., Liu, Y., Zahoor, R., Jiang, D., Dai, T., 2016. Adaptation to and recovery from drought stress at vegetative stages in wheat (*Triticum aestivum*) cultivars. *Funct. Plant Biol.* 43. <https://doi.org/10.1071/FP16150>
- Alvarez-Jubete, L., Arendt, E.K., Gallagher, E., 2010. Nutritive value of pseudocereals and their increasing use as functional gluten-free ingredients. *Trends Food Sci. Technol.* 21, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.10.014>
- Aroca, R. (Ed.), 2012. *Plant Responses to Drought Stress: From Morphological to Molecular Features*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0>
- Aubert, L., Decamps, C., Jacquemin, G., Quinet, M., 2021a. Comparison of Plant Morphology, Yield and Nutritional Quality of *Fagopyrum esculentum* and *Fagopyrum tataricum* Grown under Field Conditions in Belgium. *Plants* 10, 258. <https://doi.org/10.3390/plants10020258>
- Aubert, L., Konrádová, D., Barris, S., Quinet, M., 2021b. Different drought resistance mechanisms between two buckwheat species *FAGOPYRUM ESCULENTUM* and *FAGOPYRUM TATARICUM*. *Physiol. Plant.* 172, 577–586. <https://doi.org/10.1111/ppl.13248>
- Aubert, L., Quinet, M., 2022. Comparison of Heat and Drought Stress Responses among Twelve Tartary Buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) Varieties. *Plants* 11, 1517. <https://doi.org/10.3390/plants11111517>
- Bertoli, S., Mazzafera, P., Souza, G., 2013. Why is it so difficult to identify a single indicator of water stress in plants? A proposal for a multivariate analysis to assess emergent properties. *Plant Biol. Stuttg. Ger.* 16. <https://doi.org/10.1111/plb.12088>
- Bohnert, H.J., Jensen, R.G., 1996. Strategies for engineering water-stress tolerance in plants. *Trends Biotechnol.* 14, 89–97. [https://doi.org/10.1016/0167-7799\(96\)80929-2](https://doi.org/10.1016/0167-7799(96)80929-2)
- Bonafaccia, G., Marocchini, M., Kreft, I., 2003. Composition and technological properties of the flour and bran from common and tartary buckwheat. *Food Chem.* 80, 9–15. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00228-5](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00228-5)
- Boutraa, T., Akhkha, A., Al-Shoaibi, A.A., Alhejeli, A.M., 2010. Effect of water stress on growth and water use efficiency (WUE) of some wheat cultivars (*Triticum durum*) grown in Saudi Arabia. *J. Taibah Univ. Sci.* 3, 39–48. [https://doi.org/10.1016/S1658-3655\(12\)60019-3](https://doi.org/10.1016/S1658-3655(12)60019-3)
- Brás, T.A., Seixas, J., Carvalhais, N., Jägermeyr, J., 2021. Severity of drought and heatwave crop losses tripled over the last five decades in Europe. *Environ. Res. Lett.* 16, 065012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf004>
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P.W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W.W.L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., Jotzo, F., Krug, T., Lasco, R., Lee, Y.-Y., Masson-Delmotte, V., Meinshausen, M., Mintenbeck, K., Mokssit, A., Otto, F.E.L., Pathak, M., Pirani, A., Poloczanska, E., Pörtner, H.-O., Revi, A., Roberts, D.C., Roy, J., Ruane, A.C., Skea, J., Shukla, P.R., Slade, R., Slangen, A., Sokona, Y., Sörensson, A.A., Tignor, M., Van Vuuren, D., Wei, Y.-M., Winkler, H., Zhai, P., Zommers, Z., Hourcade, J.-C., Johnson, F.X., Pachauri, S., Simpson, N.P., Singh, C., Thomas, A., Totin, E., Arias, P., Bustamante, M., Elgizouli, I., Flato, G., Howden, M., Méndez-Vallejo, C., Pereira, J.J., Pichs-Madruga, R., Rose, S.K., Saheb, Y., Sánchez Rodríguez, R., Ürge-Vorsatz, D., Xiao, C., Yassaa, N., Alegría, A., Armour, K., Bednar-Friedl, B., Blok, K., Cissé, G., Dentener, F., Eriksen, S., Fischer, E., Garner, G., Guivarch, C., Haasnoot, M., Hansen, G., Hauser, M., Hawkins, E., Hermans, T., Kopp, R., Leprince-Ringuet, N., Lewis, J., Ley, D., Ludden, C., Niamir, L., Nicholls, Z., Some, S., Szopa, S.,

- Trewin, B., Van Der Wijst, K.-I., Winter, G., Witting, M., Birt, A., Ha, M., Romero, J., Kim, J., Haïtes, E.F., Jung, Y., Stavins, R., Birt, A., Ha, M., Orendain, D.J.A., Ignon, L., Park, S., Park, Y., Reisinger, A., Cammaramo, D., Fischlin, A., Fuglestedt, J.S., Hansen, G., Ludden, C., Masson-Delmotte, V., Matthews, J.B.R., Mintenbeck, K., Pirani, A., Poloczanska, E., Leprince-Ringuet, N., Péan, C., 2023. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. GIEC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Cawoy, V., Ledent, J.-F., Kinet, J.-M., Jacquemart, A.-L., 2019. Floral Biology of Common Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench).
- Cawoy, V., Lutts, S., Ledent, J.-F., Kinet, J.-M., 2007. Resource availability regulates reproductive meristem activity, development of reproductive structures and seed set in buckwheat (*Fagopyrum esculentum*). *Physiol. Plant.* 131, 341–353. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2007.00963.x>
- Chrungoo, N.K., Sangma, S.Ch., Bhatt, V., Raina, S.N., 2011. *Fagopyrum*, in: Kole, C. (Ed.), *Wild Crop Relatives: Genomic and Breeding Resources: Cereals*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 293–307. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14228-4_5
- Climat.be, 2024. Klim. Clim. URL <https://climat.be/changements-climatiques/changements-observe/rechauffement-planetaire>. Consulté le 19/02/2024.
- Dar, F.A., Tahir, I., Qari, S.H., Abulfaraj, A.A., Aljabri, M., Alharby, H.F., Hakeem, K.R., Rehman, R.U., 2021. Molecular Characterization and Population Genetic Structure of *Fagopyrum* Species Cultivated in Himalayan Regions. *Sustainability* 13, 12165. <https://doi.org/10.3390/su132112165>
- Daryanto, S., Wang, L., Jacinthe, P.-A., 2015. Global Synthesis of Drought Effects on Food Legume Production. *PLoS ONE* 10, e0127401. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127401>
- Descamps, C., Quinet, M., Jacquemart, A.-L., 2021. The effects of drought on plant–pollinator interactions: What to expect? *Environ. Exp. Bot.* 182, 104297. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104297>
- Dinardo, G., Dahdah, L., Cafarotti, A., Arasi, S., Fierro, V., Pecora, V., Mazzuca, C., Urbani, S., Artesani, M., Riccardi, C., Valluzzi, R., Indolfi, C., Miraglia Del Giudice, M., Fiocchi, A., 2024. Botanical Impurities in the Supply Chain: A New Allergenic Risk Exacerbated by Geopolitical Challenges. *Nutrients* 16, 628. <https://doi.org/10.3390/nu16050628>
- Durand, J.-L., 2007. Les effets du déficit hydrique sur la plante : aspects physiologiques. https://www.researchgate.net/profile/Jean-Louis-Durand/publication/341819094_Les_effets_du_deficit_hydrique_sur_la_plante_aspects_physiologiques/links/641571e0315dfb4cce8c2fdc/Les-effets-du-deficit-hydrique-sur-la-plante-aspects-physiologiques.pdf. Consulté le 11/05/2024
- Effets des changements climatiques sur l’agriculture, la sylviculture et les écosystèmes [WWW Document], 2021. <https://doi.org/10.4060/cb4769fr>
- Fabjan, N., Rode, J., Košir, I.J., Wang, Z., Zhang, Z., Kreft, I., 2003. Tartary Buckwheat (*Fagopyrum tataricum* Gaertn.) as a Source of Dietary Rutin and Quercitrin. *J. Agric. Food Chem.* 51, 6452–6455. <https://doi.org/10.1021/jf034543e>
- FAO, 2019. Water Scarcity – One of the greatest challenges of our time [WWW Document]. Newsroom. URL <https://www.fao.org/newsroom/story/Water-Scarcity-One-of-the-greatest-challenges-of-our-time/en> (accessed 4.25.24).
- Faostat, 2024. URL <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>. Consulté le 24/03/2024.

- Franco, J.A., 2011. Root Development Under Drought Stress 2. http://bulletin.upct.es/articulos/Vol2-nro6-2011-Root_Development_Under_Drought_Stress.pdf. Consulté le 01/06/2024.
- Gámez, A.L., Soba, D., Zamarreño, Á.M., García-Mina, J.M., Aranjuelo, I., Morales, F., 2019. Effect of Water Stress during Grain Filling on Yield, Quality and Physiological Traits of Illpa and Rainbow Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Cultivars. *Plants* 8, 173. <https://doi.org/10.3390/plants8060173>
- Ghannoum, O., 2009. C4 photosynthesis and water stress. *Ann. Bot.* 103, 635–644. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn093>
- GIEC, 2023a. Rapports du GIEC [WWW Document]. *Klim. Clim.* URL <https://climat.be/changements-climatiques/changements-observees/rapports-du-giec> (accessed 2.19.24).
- GIEC, 2023b. Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1st ed. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Gray, S.B., Brady, S.M., 2016. Plant developmental responses to climate change. *Dev. Biol., Plant Development* 419, 64–77. <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2016.07.023>
- Havrlentová, M., Kraic, J., Gregusová, V., Kováčsová, B., 2021. DROUGHT STRESS IN CEREALS – A REVIEW.
- He, P., Min, J., Tang, Z., Yang, X., Huang, K., Huang, X., 2024. Slight drought during flowering period can improve Tartary buckwheat yield by regulating carbon and nitrogen metabolism. *Sci. Rep.* 14, 9774. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58180-x>
- Höfer, R.J., Lindner, T., Ayasse, M., Kuppler, J., 2023. Reduced seed set under water deficit is driven mainly by reduced flower numbers and not by changes in flower visitations and pollination. *Funct. Ecol.* 37, 461–471. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.14233>
- Hoogenboom, G., Huck, M.G., Peterson, C.M., 1987. Root Growth Rate of Soybean as Affected by Drought Stress¹. *Agron. J.* 79, 607–614. <https://doi.org/10.2134/agronj1987.00021962007900040004x>
- Hunt, H.V., Shang, X., Jones, M.K., 2017. Buckwheat: a crop from outside the major Chinese domestication centres? A review of the archaeobotanical, palynological and genetic evidence. *Veg. Hist. Archaeobotany*. <https://doi.org/10.1007/s00334-017-0649-4>
- IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf [WWW Document], 2023c. URL https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf (accessed 5.28.24).
- Jacquemart, A.-L., Cawoy, V., Kinet, J.-M., Ledent, J.-F., Quinet, M., 2012. Is Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) Still a Valuable Crop Today?
- Jha, R., Zhang, K., He, Y., Mender-Drienyovszki, N., Magyar-Tábori, K., Quinet, M., Germ, M., Kreft, I., Meglič, V., Ikeda, K., Chapman, M.A., Janovská, D., Podolska, G., Woo, S.-H., Bruno, S., Georgiev, M.I., Chrungoo, N., Betekhtin, A., Zhou, M., 2024. Global nutritional challenges and opportunities: Buckwheat, a potential bridge between nutrient deficiency and food security. *Trends Food Sci. Technol.* 145, 104365. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104365>
- Koch, G., Rolland, G., Dauzat, M., Bédiée, A., Baldazzi, V., Bertin, N., Guédon, Y., Granier, C., 2019. Leaf Production and Expansion: A Generalized Response to Drought Stresses from Cells to Whole Leaf Biomass—A Case Study in the Tomato Compound Leaf. *Plants* 8, 409. <https://doi.org/10.3390/plants8100409>

- Kreft, I., Golob, A., Germ, M., 2023. A Crop of High Nutritional Quality and Health Maintenance Value: The Importance of Tartary Buckwheat Breeding. *Agriculture* 13, 1783. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091783>
- Kreft, I. (2022). Bitter seed Tartary Buckwheat. Slovenian Academy of Sciences and Arts, Ljubljana.
- Kumar, A., Dhansu, P., Mann, A. (Eds.), 2023. Salinity and Drought Tolerance in Plants: Physiological Perspectives. Springer Nature Singapore, Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-99-4669-3>
- Laxa, M., Liebthal, M., Telman, W., Chibani, K., Dietz, K.-J., 2019. The Role of the Plant Antioxidant System in Drought Tolerance. *Antioxidants* 8, 94. <https://doi.org/10.3390/antiox8040094>
- L'Europe n'est pas préparée à faire face à l'augmentation rapide des risques climatiques - Agence européenne pour l'environnement, 2024. URL <https://www.eea.europa.eu/fr/highlights/l-europe-n-est-pas> (accessed 5.28.24).
- Li, Y., Zou, J., Zhu, H., He, J., Setter, T.L., Wang, Y., Meng, Y., Chen, B., Zhao, W., Wang, S., Hu, W., Zhou, Z., 2022. Drought deteriorated the nutritional quality of cottonseed by altering fatty acids and amino acids compositions in cultivars with contrasting drought sensitivity. *Environ. Exp. Bot.* 194, 104747. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104747>
- Martínez-Villaluenga, C., Peñas, E., Hernández-Ledesma, B., 2020. Pseudocereal grains: Nutritional value, health benefits and current applications for the development of gluten-free foods. *Food Chem. Toxicol.* 137, 111178. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2020.111178>
- Meng, H.-L., Sun, P.-Y., Wang, J.-R., Sun, X.-Q., Zheng, C.-Z., Fan, T., Chen, Q.-F., Li, H.-Y., 2022. Comparative physiological, transcriptomic, and WGCNA analyses reveal the key genes and regulatory pathways associated with drought tolerance in Tartary buckwheat. *Front. Plant Sci.* 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.985088>
- Nat. Plants, 2024. Down-to-earth drought resistance. *Nat. Plants* 10, 525–526. <https://doi.org/10.1038/s41477-024-01686-z>
- Nolte, C.G., Dolwick, P., Fann, N., Horowitz, L.W., Naik, V., Pinder, R.W., Spero, T.L., Winner, D.A., Ziska, L.H., 2018. Chapter 13 : Air Quality. Impacts, Risks, and Adaptation in the United States: The Fourth National Climate Assessment, Volume II. U.S. Global Change Research Program. <https://doi.org/10.7930/NCA4.2018.CH13>
- Patel, K., Patel, D.K., 2019. Chapter 26 - The Beneficial Role of Rutin, A Naturally Occurring Flavonoid in Health Promotion and Disease Prevention: A Systematic Review and Update, in: Watson, R.R., Preedy, V.R. (Eds.), *Bioactive Food as Dietary Interventions for Arthritis and Related Inflammatory Diseases* (Second Edition). Academic Press, pp. 457–479. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813820-5.00026-X>
- Pathan, S., Ndunguru, G., Clark, K., Ayele, A.G., 2023. Yield and nutritional responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes to irrigated, rainfed, and drought-stress environments. *Front. Sustain. Food Syst.* 7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1242187>
- Qin, P., Wang, Q., Shan, F., Hou, Z., Ren, G., 2010. Nutritional composition and flavonoids content of flour from different buckwheat cultivars. *Int. J. Food Sci. Technol.* 45, 951–958. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02231.x>
- Quinet, M., Cawoy, V., Lefevre, I., Van Miegroet, F., Jacquemart, A.-L., Kinet, J.-M., 2004. Inflorescence structure and control of flowering time and duration by light in buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench). *J. Exp. Bot.* 55, 1509–1517. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh164>

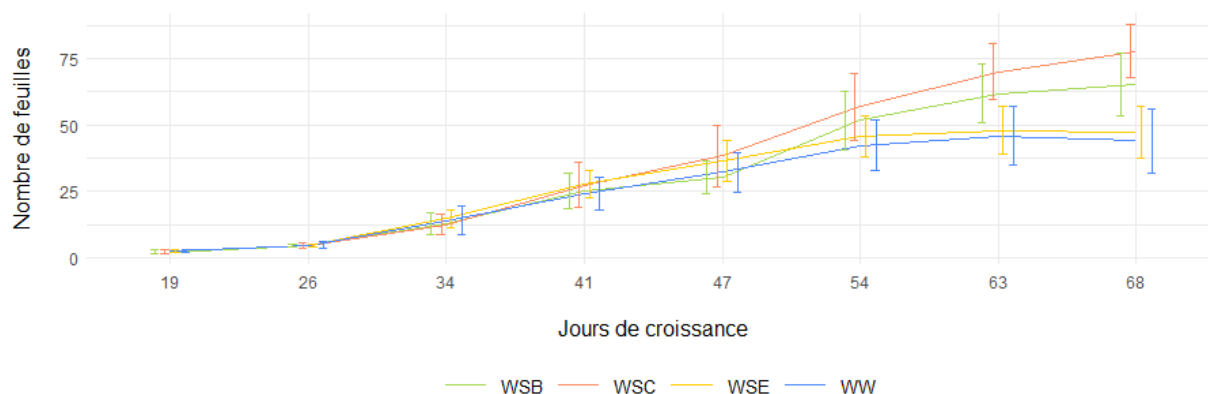
- Reddy, A.R., Chaitanya, K.V., Vivekanandan, M., 2004. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. *J. Plant Physiol.* 161, 1189–1202. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.01.013>
- Roychoudhury, A., Aftab, T., Acharya, K. (Eds.), 2022. *Omics Approach to Manage Abiotic Stress in Cereals*. Springer Nature Singapore, Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-0140-9>
- Ruan, J., Zhou, Y., Yan, J., Zhou, M., Woo, S.-H., Weng, W., Cheng, J., Zhang, K., 2022. Tartary Buckwheat: An Under-utilized Edible and Medicinal Herb for Food and Nutritional Security. *Food Rev. Int.* 38, 440–454. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1734610>
- Sabagh, E., 2019. EFFECTS OF DROUGHT STRESS ON THE QUALITY OF MAJOR OILSEED CROPS: IMPLICATIONS AND POSSIBLE MITIGATION STRATEGIES – A REVIEW. *Appl. Ecol. Environ. Res.*
- Schilperoord, P., 2017. *Plantes cultivées en Suisse - Le sarrasin* 28 p. <https://doi.org/10.22014/97839524176-E8>
- Schuppler, U., He, P.-H., John, P.C.L., Munns, R., 1998. Effect of Water Stress on Cell Division and Cdc2-Like Cell Cycle Kinase Activity in Wheat Leaves1. *Plant Physiol.* 117, 667–678. <https://doi.org/10.1104/pp.117.2.667>
- Seleiman, M.F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H.H., Battaglia, M.L., 2021. Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects. *Plants* 10, 259. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>
- Silva, A. do N., Ramos, M.L.G., Ribeiro, W.Q., de Alencar, E.R., da Silva, P.C., de Lima, C.A., Vinson, C.C., Silva, M.A.V., 2020. Water stress alters physical and chemical quality in grains of common bean, triticale and wheat. *Agric. Water Manag.* 231, 106023. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106023>
- Sinha, R., Fritschi, F.B., Zandalinas, S.I., Mittler, R., 2021. The impact of stress combination on reproductive processes in crops. *Plant Sci.* 311, 111007. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2021.111007>
- Small, E., 2017. 54. Buckwheat – the world’s most biodiversity-friendly crop? *Biodiversity* 18, 108–123. <https://doi.org/10.1080/14888386.2017.1332529>
- Smith, M.R., Veneklaas, E., Polania, J., Rao, I.M., Beebe, S.E., Merchant, A., 2019. Field drought conditions impact yield but not nutritional quality of the seed in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *PLoS ONE* 14, e0217099. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217099>
- Soni, P.G., Basak, N., Rai, A.K., Sundha, P., Chandra, P., Yadav, R.K., 2023. Occurrence of Salinity and Drought Stresses: Status, Impact, and Management, in: Kumar, A., Dhansu, P., Mann, A. (Eds.), *Salinity and Drought Tolerance in Plants*. Springer Nature Singapore, Singapore, pp. 1–28. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4669-3_1
- Stagnari, F., Galieni, A., Pisante, M., 2016. Drought stress effects on crop quality. pp. 375–392. <https://doi.org/10.1002/9781119054450.ch23>
- Suzuki, T., Morishita, T., Mukasa, Y., Takigawa, S., Yokota, S., Ishiguro, K., Noda, T., 2014. Breeding of ‘Manten-Kirari’, a non-bitter and trace-rutinosidase variety of Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* Gaertn.). *Breed. Sci.* 64, 344–350. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.64.344>
- Thomas, W.T.B., 2015. Drought-resistant cereals: impact on water sustainability and nutritional quality. *Proc. Nutr. Soc.* 74, 191–197. <https://doi.org/10.1017/S0029665115000026>

- Journal Le Temps. Trente ans après, quel bilan tirer du Sommet de la Terre de Rio?, 2022. <https://www.letemps.ch/sciences/environnement/trente-ans-apres-bilan-tirer-sommet-terre-rio>. Consulté le 24/04/2024
- US EPA, O., 2022. Climate Change Impacts on Agriculture and Food Supply [WWW Document]. URL <https://www.epa.gov/climateimpacts/climate-change-impacts-agriculture-and-food-supply> (accessed 4.28.24).
- US EPA, O., 2015. Ecosystem Effects of Ozone Pollution [WWW Document]. URL <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ecosystem-effects-ozone-pollution> (accessed 4.28.24).
- USGCRP, 2018. Fourth National Climate Assessment. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC.
- Walsh, M., Backlund, P., Buja, L., DeGaetano, A., Melnick, R., Prokopy, L., Takle, E., Todey, D., Ziska, L., 2020. Climate Indicators for Agriculture. United States. Department of Agriculture. Climate Change Program Office. <https://doi.org/10.32747/2020.7201760.ch>
- Wan, C., Dang, P., Gao, L., Wang, J., Tao, J., Qin, X., Feng, B., Gao, J., 2022. How Does the Environment Affect Wheat Yield and Protein Content Response to Drought? A Meta-Analysis. *Front. Plant Sci.* 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.896985>
- Wirth, J., 2017. Les Cultures intermédiaires allélopathiques: un moyen de lutte contre les adventices ?
- Wu, L., Wang, B., Schoen, D.J., Huang, S., 2017. Transitions from distyly to homostyly are associated with floral evolution in the buckwheat genus (*Fagopyrum*). *Am. J. Bot.* 104, 1232–1240. <https://doi.org/10.3732/ajb.1700189>
- Xiang, D., Ma, C., Song, Y., Wu, Q., Wu, X., Sun, Y., Zhao, G., Wan, Y., 2019. Post-Anthesis Photosynthetic Properties Provide Insights into Yield Potential of Tartary Buckwheat Cultivars. *Agronomy* 9, 149. <https://doi.org/10.3390/agronomy9030149>
- Xiang, D., Peng, L., Zhao, J.-L., Zou, L., Zhao, G., Song, C., 2013. Effect of drought stress on yield, chlorophyll contents and photosynthesis in tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*). *J. Food Agric. Environ.* 11, 1358–1363.
- Ye, H., Roorkiwal, M., Valliyodan, B., Zhou, L., Chen, P., Varshney, R.K., Nguyen, H.T., 2018. Genetic diversity of root system architecture in response to drought stress in grain legumes. *J. Exp. Bot.* 69, 3267–3277. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery082>
- Zhang, J., Zhang, S., Cheng, M., Jiang, H., Zhang, X., Peng, C., Lu, X., Zhang, M., Jin, J., 2018. Effect of Drought on Agronomic Traits of Rice and Wheat: A Meta-Analysis. *Int. J. Environ. Res. Public. Health* 15, 839. <https://doi.org/10.3390/ijerph15050839>
- Zhou, M., Tang, Yu, Deng, X., Ruan, C., Ding, M., Shao, J., Tang, Yixiong, Wu, Y., 2018a. Description of Cultivated Tartary Buckwheat, in: *Buckwheat Germplasm in the World*. Elsevier, pp. 45–52. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811006-5.00005-7>
- Zhou, M., Tang, Yu, Deng, X., Ruan, C., Ding, M., Shao, J., Tang, Yixiong, Wu, Y., 2018b. Description of Cultivated Common Buckwheat, in: *Buckwheat Germplasm in the World*. Elsevier, pp. 53–60. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811006-5.00006-9>
- Zhou, X., Hao, T., Zhou, Y., Tang, W., Xiao, Y., Meng, X., Fang, X., 2015. Relationships between antioxidant compounds and antioxidant activities of tartary buckwheat during germination. *J. Food Sci. Technol.* 52, 2458–2463. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1290-1>

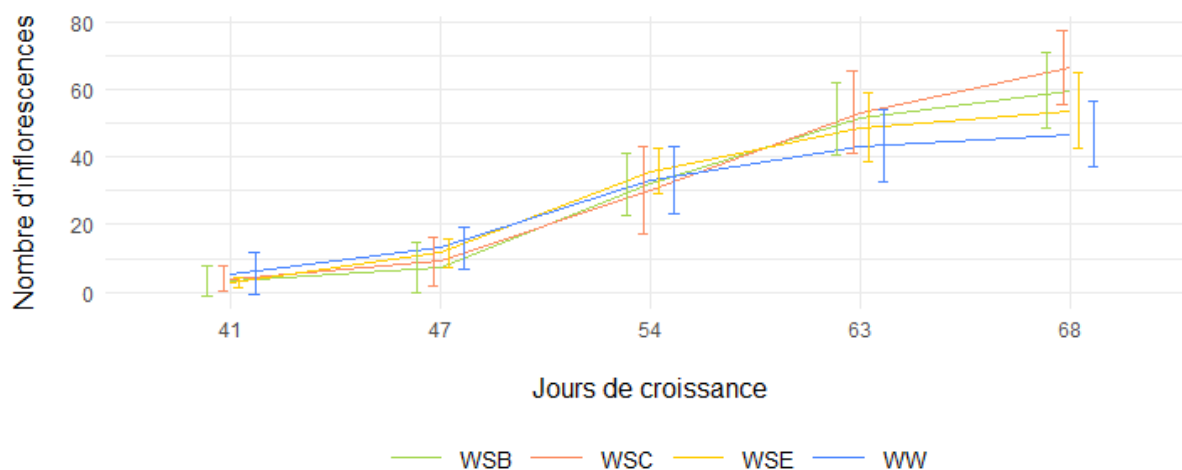
- Zhu, F., 2016a. Chemical composition and health effects of Tartary buckwheat. *Food Chem.* 203, 231–245. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.02.050>
- Zhu, F., 2016b. Buckwheat starch: Structures, properties, and applications. *Trends Food Sci. Technol.* 49, 121–135. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.12.002>
- Zielińska, D., Turemko, M., Kwiatkowski, J., Zieliński, H., 2012. Evaluation of Flavonoid Contents and Antioxidant Capacity of the Aerial Parts of Common and Tartary Buckwheat Plants. *Molecules* 17, 9668–9682. <https://doi.org/10.3390/molecules17089668>

VII. Annexes

Annexe 1 : Evolution du nombre de feuilles par condition de traitement en fonction du jour de croissance en données non transformées. WSB : stress hydrique en début de culture, WSC, stress hydrique continu ; WSE : stress hydrique en fin de culture ; WW : plantes témoins bien arrosées (100% FC).



Annexe 2 : Evolution du nombre d'inflorescences par condition de traitement en fonction du jour de croissance en données non transformées. WSB : stress hydrique en début de culture, WSC, stress hydrique continu ; WSE : stress hydrique en fin de culture ; WW : plantes témoins bien arrosées (100% FC).



Annexe 3 : Tableau récapitulatif des mesures réalisées au cours de l'expérience pour chaque condition de traitement (WSB : stress hydrique en début de culture, WSC, stress hydrique continu ; WSE : stress hydrique en fin de culture ; WW : plantes témoins bien arrosées (100% FC)). Résultats présentés sous forme de moyenne $\pm$ écart-type et tests statistiques réalisés grâce à une ANOVA 1 si données paramétriques ou un test de Kruskal-Wallis en cas de données non paramétriques. Les conditions de traitement qui partagent une même lettre ne sont significativement pas différentes à un seuil de 5% (test de Tukey).

	WSB	WSC	WSE	WW	Test statistique (ANOVA 1 ou Kruskal-Wallis)
Nœud de la 1 ^{ère} inflorescence	7.2 $\pm$ 2.251	7.9 $\pm$ 0.475	8 $\pm$ 0.426	7.89 $\pm$ 0.58	$\chi^2_3 = 1.1963$ P = 0.7539
Taille finale [cm]	119.7 $\pm$ 24.84 a	119 $\pm$ 8.343 a	113.2 $\pm$ 14.3 a	109.8 $\pm$ 24.04 a	$F_{3,20} = 0.366$ P = 0.779
Nombre de ramifications à la deuxième récolte	7 $\pm$ 1.265 a	6.83 $\pm$ 0.408 a	6.67 $\pm$ 1.03 a	6.5 $\pm$ 1.05 a	$F_{3,8} = 0.282$ P = 0.837
Nombre de feuilles par ramification à la deuxième récolte	7.67 $\pm$ 2.77 b	11.15 $\pm$ 2.93 c	6.45 $\pm$ 2.19 b	4.33 $\pm$ 2.59 a	$F_{3,158} = 46.92$ P < 2*10 ⁻¹⁶
Nombre d'inflorescences par ramification à la deuxième récolte	9.55 $\pm$ 4.22 a	12.27 $\pm$ 3.768 b	9.05 $\pm$ 3.15 a	7.821 $\pm$ 2.972 a	$F_{3,158} = 11.12$ P < 1.16*10 ⁻⁶
Potentiel osmotique à la deuxième récolte [MPa]	- 0.815 $\pm$ 0.223 a	-1.23 $\pm$ 0.286 a	-1.03 $\pm$ 0.070 a	- 0.744 $\pm$ 0.1306 a	$F_{3,8} = 3.786$ P = 0.0587
Teneur relative en chlorophylle à la deuxième récolte	22.29 $\pm$ 6.32 a	28.82 $\pm$ 1.64 a	20.48 $\pm$ 2.482 a	18.17 $\pm$ 11.1 a	$F_{3,8} = 1.471$ P = 0.294
Concentration en polyphénols [mg/g MF]	Feuilles	8.54 $\pm$ 4.72 a	4.46 $\pm$ 2.10 a	6.44 $\pm$ 3.81 a	$F_{3,7} = 0.769$ P = 0.547
	Inflorescences	2.13 $\pm$ 0.20 a	2.52 $\pm$ 0.60 a	2.76 $\pm$ 0.50 a	$F_{3,7} = 1.307$ P = 0.346
	Concentration totale	10.67 $\pm$ 4.57 a	6.98 $\pm$ 1.50 a	9.19 $\pm$ 4.06 a	$F_{3,7} = 0.608$ P = 0.631
Concentration en flavonoïdes [mg/g MF]	Feuilles	1.36 $\pm$ 1.02 a	0.84 $\pm$ 0.19 a	1.59 $\pm$ 0.35 a	$F_{3,7} = 1.329$ P = 0.339
	Inflorescences	1.40 $\pm$ 0.89 a	0.71 $\pm$ 0.08 a	0.81 $\pm$ 0.10 a	$F_{3,7} = 1.027$ P = 0.437
	Concentration totale	2.75 $\pm$ 0.87 a	1.55 $\pm$ 0.27 a	2.40 $\pm$ 0.45 a	$F_{3,7} = 1.874$ P = 0.222
Poids de 1000 grains [g]	16.3 $\pm$ 0.346 ab	15.1 $\pm$ 0.681 a	15.9 $\pm$ 0.382 ab	16.9 $\pm$ 0.488 b	$F_{3,8} = 7.309$ P = 0.0111

Impact d'un stress hydrique sur le développement, la production et la qualité nutritionnelle des graines du sarrasin de Tartarie (*Fagopyrum tataricum*).

Lore Detienne

Le GIEC est unanime sur l'évolution du changement climatique et des impacts de celui-ci sur l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques extrêmes. L'agriculture est l'un des secteurs les plus touchés par ces changements et le stress hydrique est l'un des facteurs environnementaux les plus limitants pour la productivité des cultures dans le monde. C'est pourquoi il est important et nécessaire à l'heure actuelle d'étudier les impacts d'un stress hydrique sur la croissance et la physiologie des plantes. Dans le cadre de ce travail, l'impact d'un stress hydrique sur la production, le développement et la qualité nutritionnelle des graines du sarrasin de Tartarie de la variété Zlata a été étudié. Le stress hydrique étudié est celui d'un manque d'eau au cours de la croissance de la plante. Le sarrasin est une pseudo-céréale cultivée pour ses avantages écologiques, mais aussi pour son potentiel dans l'alimentation humaine et dans la médecine. Le sarrasin est connu pour être une plante capable de bien s'adapter à son environnement, ce qui le rend résilient aux changements climatiques et aux nombreux stress environnementaux. Cette résistance est particulièrement importante chez le sarrasin de Tartarie. Au cours de cette expérience, des stress hydriques ont été étudiés à différents moments de la croissance du sarrasin de Tartarie (un stress hydrique durant la phase végétative, un stress hydrique durant la floraison, un stress hydrique continu et une condition témoin) afin de répondre à deux objectifs : Le premier objectif était de comparer l'impact d'un stress hydrique sur la croissance et la physiologie du sarrasin de Tartarie en fonction des conditions de traitement sur base de mesures morphologiques et physiologiques. Le deuxième objectif était l'analyse de l'impact d'un stress hydrique à différents moments de la croissance sur le rendement et la qualité nutritionnelle des graines récoltées. Au terme de cette étude, les résultats montrent que la croissance morphologique et physiologique des plantes de sarrasin de Tartarie n'a pas été impactée négativement en fonction du moment d'application du stress hydrique. Ces observations confirment les stratégies de tolérance mises en place par le sarrasin de Tartarie face à un stress hydrique grâce au maintien de son potentiel hydrique et de sa croissance végétative lors d'une sécheresse. En ce qui concerne l'impact sur le rendement et la qualité nutritionnelle des graines récoltées en fin d'expérience, un stress hydrique diminue le rendement et influence les concentrations en protéines et de sucres mesurées dans les graines. Cependant, aucun impact n'a été observé sur les concentrations en minéraux et en antioxydants mesurées dans les graines.

Il serait intéressant de poursuivre cette recherche en conditions de champ pour comparer ces résultats avec ceux obtenus dans des conditions réelles et sur un échantillon de plantes plus important.

Mots clés : Sarrasin de Tartarie, *Fagopyrum tataricum*, stress hydrique, sécheresse, qualité nutritionnelle, production.