

Faculté des bioingénieurs

Comparaison des qualités nutritionnelles du sarrasin commun (*Fagopyrum esculentum*) et de Tartarie (*Fagopyrum tataricum*) et impact des changements climatiques sur la croissance et la production du sarrasin de Tartarie (*Fagopyrum tataricum*)

Auteur : Christiane Lynn F. Sia

Promoteur(s) : Prof. Muriel Quinet (UCL/SST/ELIA)

Lecteur(s) : Prof. Stanley Lutts (UCL/SST/ELIA)
Prof. Guillaume Lobet (UCL/AGRO/ELIA)

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

Année académique 2019-2020

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation.

Je tiens à remercier ma promotrice Muriel Quinet, pour m'avoir permis d'effectuer mon mémoire dans son laboratoire, pour sa disponibilité, son encadrement et ses conseils.

Je tiens également à remercier aussi tous les membres du GRPV et particulièrement Lauranne, Servane, Mathilde, Baudoin, Marie- Eve qui m'ont toujours apporté leur aide quand j'en avais besoin.

Je remercie tout particulièrement Lauranne Aubert, pour toute son aide dans la réalisation de mes analyses au laboratoire. Merci pour ta disponibilité, ton temps, tes conseils, tes explications, tes encouragements et pour tout le reste.

Je remercie les professeurs Stanley Lutts et Guillaume Lobet pour avoir accepté de faire partie de mon Jury de mémoire.

Je remercie le professeur Yvan Larondelle de m'avoir permis de faire les dosages des protéines au sein de son laboratoire.

Je remercie Monsieur Christian Zewen et le Professeur Ivan Kreft de l'université de Ljubljana sans qui je n'aurais pas pu avoir les échantillons provenant de la Slovénie et du Luxembourg.

Je remercie Marie-Eve Renard, Servane, Mathilde pour leur aide et leur explication dans la réalisation de mes analyses portant sur le dosage des minéraux.

Je remercie également ma famille et mes amis qui n'ont jamais cessé de me soutenir durant mes études, qui ont toujours été là dans les bons comme dans les mauvais moments, et qui ont toujours cru en moi. En dernier, mais non des moindres, je remercie Dieu sans lui rien n'aurait pu être possible.

Résumé

C'est une évidence irréfutable que le climat change, cela affecte la santé humaine et son impact sur l'agriculture n'est pas négligeable car elle modifie le cycle de vie des plantes. L'objectif de ce travail est primo, de comparer les qualités nutritionnelles du sarrasin commun (*Fagopyrum esculentum*) et de Tartarie (*Fagopyrum tartaricum*), et secundo d'étudier les effets des changements climatiques, plus précisément les effets d'un stress thermique et hydrique, sur la croissance et la reproduction de deux variétés du sarrasin de Tartarie (*Fagopyrum tartaricum* var. Zlata et Izlek). Le premier volet de ce mémoire a porté sur la comparaison des qualités nutritionnelles des graines du sarrasin commun (var. la Harpe et Darja) et de Tartarie (var. Izlek et Zlata). Les graines analysées provenaient d'un essai fait en champ en été 2019. Après les dosages biochimiques des protéines, acides aminés et minéraux des graines des 4 variétés, il a été constaté une teneur plus élevée en K (var. la Harpe-Darja : 5.64-4.47mg/g ; var. Izlek- Zlata : 4.54-4.44mg/g) et Mg (var. la Harpe – Darja : 1.77-1.60 mg/g ; var Izlek- Zlata : 1.49-1.29 mg/g) chez les 2 espèces par rapport aux teneurs en Cu, Fe et Zn avec une teneur en Mg supérieur chez l'espèce *F. esculentum*. Les teneurs en protéines observées étaient également plus importantes chez *F.esculentum* (var. la Harpe-Darja : 0.176-0.152 g/g) par rapport aux teneurs chez *F.tataricum* (var Izlek-Zlata : 0.129-0.122g/g). Les teneurs en acides aminés étaient aussi similaires entre espèces excepté la teneur en proline qui était plus élevée chez *F.tataricum* (var. Harpe-Darja : 1.73-2.33 mg /g; var. Izlek -Darja :1.933-2.4 mg/g). La deuxième expérience a été réalisée en serre sur une période de trois mois. Les plantes des 2 variétés ont été soumises à deux températures, 21° et 29°C et ce, sous deux conditions d'arrosage : arrosage normal et stress hydrique. Dans l'expérience réalisée en serre à 21° C, le principal effet observé sous les deux conditions de manière générale, fut quantitativement semblable. Les plantes Zlata et Izlek en état de stress hydrique ont produit approximativement un même nombre de feuilles et d'inflorescences que celles en condition contrôlée. Cependant, chez les plantes stressées ces inflorescences présentaient un nombre réduit de fleurs. A 29°C, la variété Zlata à produit plus de feuilles et d'inflorescences qu'à 21°C et durant toute l'expérience a été impactée par l'effet du stress hydrique contrairement à la variété Izlek qui fut plus impactée par la température que par le stress thermique. Face donc au stress thermique, les variétés ont augmenté leur taux de transpiration et leur conductance stomatique, le stress hydrique quant à lui a réduit la conductance stomatique pour éviter d'importante perte en eau. La température et le stress ont entraîné une réduction de la surface foliaire chez les 2 espèces. Celles soumises au stress combiné, ont connu une croissance végétative et une phase de reproduction au ralenti. Certes la variété Izlek n'a pas été impacté par les stress hydrique à 21°C comme la variété Zlata mais elle s'est montrée moins résistante que la variété Zlata, surtout à haute température et elle a produit moins de feuilles, moins d'inflorescences et moins de graines.

Mots clés : *F.esculentum*, *F.tataricum*, stress thermique, stress hydrique , Izlek, Zlata, La Harpe, Darja

Abstract

It is irrefutable evidence that the climate is changing, it affects human health and its impact on agriculture is not negligible as it modifies the life cycle of plants. The objective of this work is firstly, to compare the nutritional qualities of common buckwheat (*Fagopyrum esculentum*) and Tartary (*Fagopyrum tartaricum*), and secondly to study the effects of climate change, specifically the effects of heat and water stress, on the growth and reproduction of two varieties of Tartarian buckwheat (*Fagopyrum tartaricum* var. *Zlata* and *Izlek*).

The first part of this master's thesis focused on the comparison of the nutritional qualities of common buckwheat seeds (var. *la Harpe* and *Darja*) and Tartarian (var. *Izlek* and *Zlata*). The seeds analysed came from a field trial carried out in summer 2019. After biochemical assays of proteins, amino acids and minerals in the seeds of the 4 varieties, a higher K content was found (var. *la Harpe-Darja*: 5.64-4.47mg/g; var. *Izlek- Zlata*: 4.54-4.44mg/g) and Mg (var. *la Harpe-Darja*: 1.77-1.60 mg/g; var. *Izlek-Zlata*: 1.49-1.29 mg/g) in both species compared to the contents of Cu, Fe and Zn with a higher Mg content in *F. esculentum*. The protein contents observed were also higher in *F. esculentum* (var. *Harpe-Darja*: 0.176-0.152 g/g) compared to the contents in *F. tataricum* (var. *Izlek-Zlata*: 0.129-0.122g/g). Amino acid contents were also similar between species except the proline content which was higher in *F. tataricum* (var. *La harpe-Darja* 1.73-2.33 mg/g; var. *Izlek -Zlata* :1.933-2.4 mg/g). The second experiment was carried out in the greenhouse over a period of three months. The plants of the 2 varieties were subjected to two temperatures, 21° and 29°C under two watering conditions: normal watering and hydric stress. In the experiment carried out in the greenhouse at 21° C, the main effect observed under both conditions was quantitatively similar. The *Zlata* and *Izlek* plants under water stress produced approximately the same number of leaves and inflorescences as those under controlled conditions. However, in the stressed plants these inflorescences had a reduced number of flowers. At 29°C, the *Zlata* variety produced more leaves and inflorescences than at 21°C and throughout the experiment was impacted by the effect of water stress unlike the *Izlek* variety which was more impacted by temperature than by heat stress. Faced with heat stress, the varieties increased their transpiration rate and stomatal conductance, while water stress reduced stomatal conductance to avoid significant water loss. Temperature and stress caused a reduction in leaf area in both species. Those under combined stress experienced slower vegetative growth and reproduction. Although the *Izlek* variety was not affected by water stress at 21°C like the *Zlata* variety, it was less resistant than the *Zlata* variety, especially at high temperatures, and produced fewer leaves, fewer inflorescences and fewer seeds.

Keywords: *F. esculentum*, *F. tataricum*, thermal stress, water stress, *Izlek*, *Zlata*, *La Harpe*, *Darja*

Table des matières

Résumé.....	2
Abstract	3
Introduction générale.....	6
I. Revue bibliographique	8
A. Le sarrasin (<i>Fagopyrum Mill</i>)	8
1. Histoire et origine du Sarrasin.....	8
2. Production mondiale.....	8
3. Description morphologique.....	9
3.1 Sarrasin commun.....	9
3.2. Sarrasin de Tartarie.....	13
4. Exigences écologiques et intérêts agronomiques du sarrasin.....	14
5. Caractéristiques agronomiques.....	16
5.1 Semis	16
5.2 Croissance et développement	16
5.3 Récolte.....	17
6. Utilisations.....	17
6.1 Usage alimentaire.....	17
6.2 Usage médical	20
B. Impact du changement climatique sur l’agriculture	21
1. Impact du stress thermique sur la culture du sarrasin.....	22
2. Impact du stress hydrique sur la culture du sarrasin.....	22
II. Matériels et méthodes.....	23
A. Qualités nutritionnelles des graines de sarrasin commun et de Tartarie	23
Matériel végétal et conditions de culture.....	23
1. Paramètre de rendement (poids des 1000 graines).....	23
a. Dosages des protéines	23
b. Dosage des minéraux.....	24
c. Dosage des acides aminés	24
B. Impact du stress thermique et hydrique sur la culture du sarrasin de Tartarie	25
Matériel végétal et conditions de culture.....	25
1. Mesures non destructives	26
a. Mesures morphologiques.....	26
b. Mesures physiologiques	27
2. Mesures destructives	27
a. Poids frais, poids sec et teneur en eau	27

3.	Analyses statistiques.....	27
III.	Résultats	28
	Qualité nutritionnelle des graines de sarrasin commun et de Tartarie	28
1.	Poids de 1000 grains des graines de sarrasin.....	28
2.	Teneurs en minéraux dans les graines de sarrasin commun et de Tartarie.....	28
3.	Teneurs en protéines dans les graines de sarrasin commun et de Tartarie	29
4.	Teneurs en acides aminés dans les graines de sarrasin.....	29
	Impact des stress thermique et hydrique sur le sarrasin de Tartarie.....	31
1.	Croissance végétative	31
1.1.	Poids frais, poids secs et teneurs en eau	35
2.	Mesures physiologiques	36
3.	Phase reproductive	39
3.1.	Production d'inflorescences en anthèse.....	39
3.2.	Production de graines	42
4.	Teneur en minéraux des graines	44
IV.	Discussion	46
1)	Qualité nutritionnelle des graines de sarrasin commun et de Tartarie.....	46
2)	Effet de la température et du stress hydrique sur la croissance végétative,.....	50
	la physiologie , la reproduction, et la qualité des graines.....	50
	Conclusion.....	56
	Perspectives	57
	Bibliographie	58

Introduction générale

Au cours de la dernière décennie, le marché *sans gluten* a connu une croissance rapide, stimulé par une plus grande sensibilité à la maladie cœliaque ou intolérance au gluten, mais aussi par le fait que les consommateurs choisissent de suivre un régime sans gluten. La maladie cœliaque est une pathologie digestive qui cause des dommages dans la muqueuse interne de l'intestin grêle (Battu, 2017).

Le seul traitement, à l'heure actuelle approuvé pour les personnes souffrantes de cette pathologie est d'éviter à vie tout aliment contenant du gluten (seigle, blé, avoine, orge ou leurs souches hybridées) ainsi que des aliments produits à partir de ces céréales. Les industries agroalimentaires ont donc mis en place une gamme variée de produits alimentaires sans gluten mais leur profil nutritionnel laisse souvent à désirer (Juhász et al., 2020). La consommation du sarrasin, pourrait donc être un soulagement pour toutes ces personnes atteintes par cette pathologie, car c'est une pseudo-céréale qui en plus de ne pas contenir du gluten, possède de grandes qualités nutritionnelles (Almeselmani et al., 2006).

Il existe plusieurs espèces de sarrasin, mais celles qui sont généralement cultivées pour la consommation humaine sont : le sarrasin commun ou blé noir (*Fagopyrum esculentum*) et le sarrasin de Tartarie ou blé noir fourrager (*Fagopyrum tartaricum*) (Halbrecq et al., 2005). Le sarrasin présente de potentiels avantages pour la santé et, en tant que telle, attire l'attention du secteur de l'alimentation en raison de la présence de protéines de haute qualité, d'acides gras insaturés, de minéraux, de vitamines, polyphénols et d'antioxydants. Cependant, les conditions culturelles et environnementales peuvent affecter les qualités nutritives de ses graines.

Selon le rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2012), il y'a de cela quelques années, les changements climatiques ont été longtemps mis en doute dans leur existence même. C'est un phénomène d'origine anthropique devenu, au fil du temps une réalité irréfutable qui, avec ses potentielles conséquences sur la vie, la nature et les organisations humaines, fascine et angoisse (Besancenot et al., 2019; Pachauri et al., 2015). Force est de constater que l'agriculture souvent pointée du doigt comme cause aggravante, n'est également pas épargnée.

Dans le cadre de ce mémoire, nous allons dans un premier temps, (1) comparer les qualités nutritionnelles des graines de deux cultivars de sarrasin commun et de Tartarie cultivés en champ. Cette pseudo-céréale est connue pour sa teneur élevée en minéraux majoritairement en potassium et magnésium, ses bonnes teneurs en protéines, acides aminés et antioxydants. Cependant, dans ce mémoire seules les teneurs en minéraux, protéines et acides aminés seront

analysées. Ensuite, (2) observer le comportement du sarrasin de Tartarie lorsqu'il fait face aux changements climatiques notamment voir dans quelles mesures ces changements (hausse de température, stress hydrique et stress combiné) affectent le développement végétatif, physiologique, la reproduction et la qualité nutritionnelle des graines de deux cultivars de cette espèce. En effet, cette espèce reste peu connue par rapport au sarrasin commun et l'impact des changements climatiques sur sa croissance et sa qualité nutritive reste largement inconnu.

I. Revue bibliographique

A. Le sarrasin (*Fagopyrum Mill*)

1. Histoire et origine du Sarrasin

Le sarrasin est l'une des plus anciennes cultures domestiquées d'Asie (Jacquemart et al., 2012), d'Europe centrale et orientale et a été principalement utilisée comme aliment de base, en particulier dans les régions arides du monde (Farooq et al., 2016). Sa domestication remonte à environ 4000 à 500 ans ACN dans le sud de la Chine (Farooq et al., 2016; Jacquemart et al., 2012). Il est utilisé comme culture de subsistance dans de nombreuses régions montagneuses où il est souvent cultivé avec l'orge à haute altitude (Juhász et al., 2020; Williams, 1995). La Chine est considérée comme le centre d'origine du sarrasin mais sa culture s'est principalement répandue en Inde, au Népal, au Bhoutan, ainsi que dans les régions fraîches et humides du Canada, de la Mongolie, de la Corée du Nord, de la Russie, de l'Europe et des Etats-Unis (Campbell, 1997).

Le sarrasin est une culture dicotylédone estivale appartenant à la famille des Polygonacées et au genre *Fagopyrum* (Hunt et al., 2018; Jacquemart et al., 2012; Lachmann & Adachi, 1990). C'est une pseudo-céréale produisant des graines à coque noire, remplies d'amidon (Halbrecq et al., 2005), mais ses graines sont généralement classées parmi les céréales en raison de leur utilisation similaire. Le genre *Fagopyrum* compte plus d'une vingtaine d'espèces mais seules deux espèces, qui ont une valeur économique, seront étudiées dans le cadre de ce mémoire : La première est le sarrasin commun ou blé noir (*Fagopyrum esculentum*) qui comme son nom l'indique est l'espèce la plus cultivée dans le monde (Jacquemart et al., 2012; Kadyrova & Mukhametshina, 2015) ; elle est originaire du sud-ouest de la Chine dans la région Yuhan et s'est progressivement propagée à tous les continent (Fabjan et al., 2003; Small, 2017). La seconde espèce est le sarrasin de Tartarie ou encore blé noir fourrager (*Fagopyrum tataricum*) qui est également originaire du sud-ouest de la Chine mais de la région de Sichuan ; elle est cultivée dans de nombreuses régions du monde mais est généralement consommée ou commercialisée localement (Campbell, 1997).

2. Production mondiale

Comme mentionné précédemment, le sarrasin commun est l'espèce de sarrasin la plus répandue dans le monde et on la retrouve sur tous les continents (Hunt et al., 2018; M. Zhou et al., 2018). Selon les données de FAOSTAT, la production mondiale fut maximale en 1992 (figure 1) avec une quantité totale de 4 975 234 tonnes pour une superficie récoltée de 4 990 505 ha (FAOSTAT, 2020). En dépit du fait que cette culture a un intérêt économique non

négligeable et présente des qualités nutritionnelles exceptionnelles, sa production est en baisse dans le monde depuis lors, en raison de son faible coût et de son rendement irrégulier (FAOSTAT 2020, Jacquemart et al., 2012, figure 1). Durant au moins 2 décennies la Chine et la Russie se sont disputés la première place au classement mondiale des producteurs de sarrasin. Certains pays de l'Europe de l'ouest tel la France occupent également une place importante depuis 2010 dans le classement avec une production couvrant 9% de la production mondiale (FAOSTAT, 2020). En 2016, la production annuelle de la Russie fut de 1 186 333 tonnes soit 50% de la production mondiale faisant d'elle le premier producteur mondial avec 1 121 671 ha de terres cultivées et la Chine se classe en deuxième rang mondiale (FAOSTAT, 2020). En 2018, la Chine reprend la place de leader mondial avec 1 134 988 tonnes pour 931 713 tonnes pour la Russie ; ils sont suivis par l'Ukraine, la France, le Kazakhstan et la Pologne (Suvorova & Zhou, 2018).

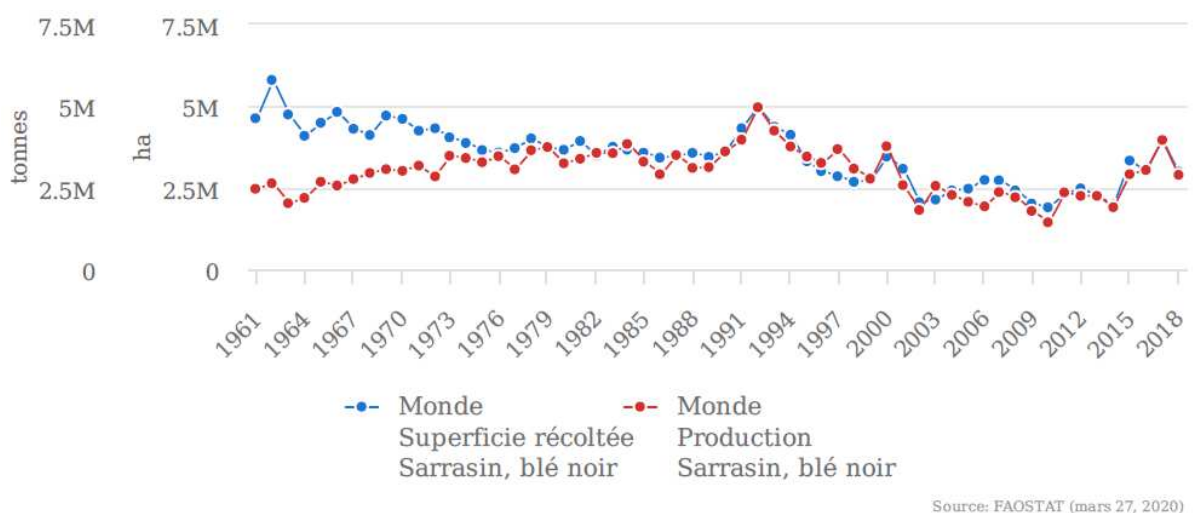


Figure 1 : Production et superficie cultivée de sarrasin ou blé noir dans le monde, 1961-2018 (FAO, 2020)

3. Description morphologique

3.1 Sarrasin commun

Le sarrasin commun (*Fagopyrum esculentum*) est une plante herbacée annuelle pouvant atteindre 1-1,5 m, quand les conditions sont propices et en fonction de la variété (Campbell, 1997; Schilperoord, 2017). Il a une racine primaire et une tige lisse dressée, verte ou rouge (Williams, 1995; Zhou et al., 2018b). Les inflorescences sont épaisses et denses (Campbell, 1997) contrairement à celles du sarrasin de Tartarie. Ces feuilles sont simples, larges et ont une forme cordiforme (figure2) qui rappelle celles des feuilles de lierre, les cotylédons arrondis sont un peu plus foncés et plus fermes ; ils se distinguent donc nettement des feuilles suivantes (Schilperoord, 2017).

Les fleurs du sarrasin commun sont regroupées en inflorescences composées (Quinet et al., 2004). La couleur de ses fleurs varie du blanc au rose, selon la variété. Selon Campbell (1997), les fleurs du sarrasin commun sont parfaites mais restent incomplètes car le périanthé ne contient qu'un cycle d'organes, on parlera donc de tépales. Le périgone est composé de cinq tépales pétaloïdes qui sont généralement blancs, roses ou rose foncé et la fleur a un diamètre de 6 mm (Campbell, 1997).

Un mois après les semis, la floraison du sarrasin est abondante et perdure et chaque plante produit plusieurs centaines de fleurs sur 2-3 mois (Kadyrova & Mukhametshina, 2015; Quinet et al., 2004). Le sarrasin commun est hétérostyle et on distingue donc deux types de fleurs : le morphe longistyle (figure 4D) qui présente des fleurs dont les styles sont plus longs que les étamines et le morphe brévistyle (figure 4F) qui présente des fleurs dont les styles sont nettement plus courts que les étamines qui les entourent (Williams, 1995; Campbell, 1997; Schilperoord, 2017). Chaque plante ne possède qu'un seul morphe de fleur (Williams, 1995). En plus de l'hétérostyle, le sarrasin commun présente une auto-incompatibilité génétique, il ne peut donc y avoir d'autofécondation intra-morphe et seule une pollinisation croisée inter-morphe peut mener à la fécondation (Campbell, 1997 ; Cawoy et al., 2008 ; Schilperoord, 2017). Cette pollinisation croisée est effectuée parfois par le vent mais le plus souvent par des insectes et l'abeille domestique est présentée comme le principal pollinisateur du sarrasin commun (Campbell, 1997; Cawoy et al., 2008 ; Jacquemart et al., 2012). Après fécondation, l'ovaire qui ne contient qu'une seule ovule donnera un fruit de type akène (qui est communément appelé graine) (Jacquemart et al., 2007). Les akènes du sarrasin commun ont des formes et des couleurs variées (figure 3). Ils mesurent plus de 5 mm de long (Campbell, 1997) ont la forme d'un trigone et sont généralement dotés d'angles aigus ce qui leur confère une certaine ressemblance avec les fânes du hêtre (Schilperoord, 2017; Zhou et al., 2018b).



Figure 2 : Plantule du sarrasin Commun (F. esculentum). Les cotylédons arrondis, un peu plus foncés et plus fermes (Schilperoord, 2017)



Figure 3 : Akènes du sarrasin commun forme et Couleurs variées (Schilperoord, 2017)

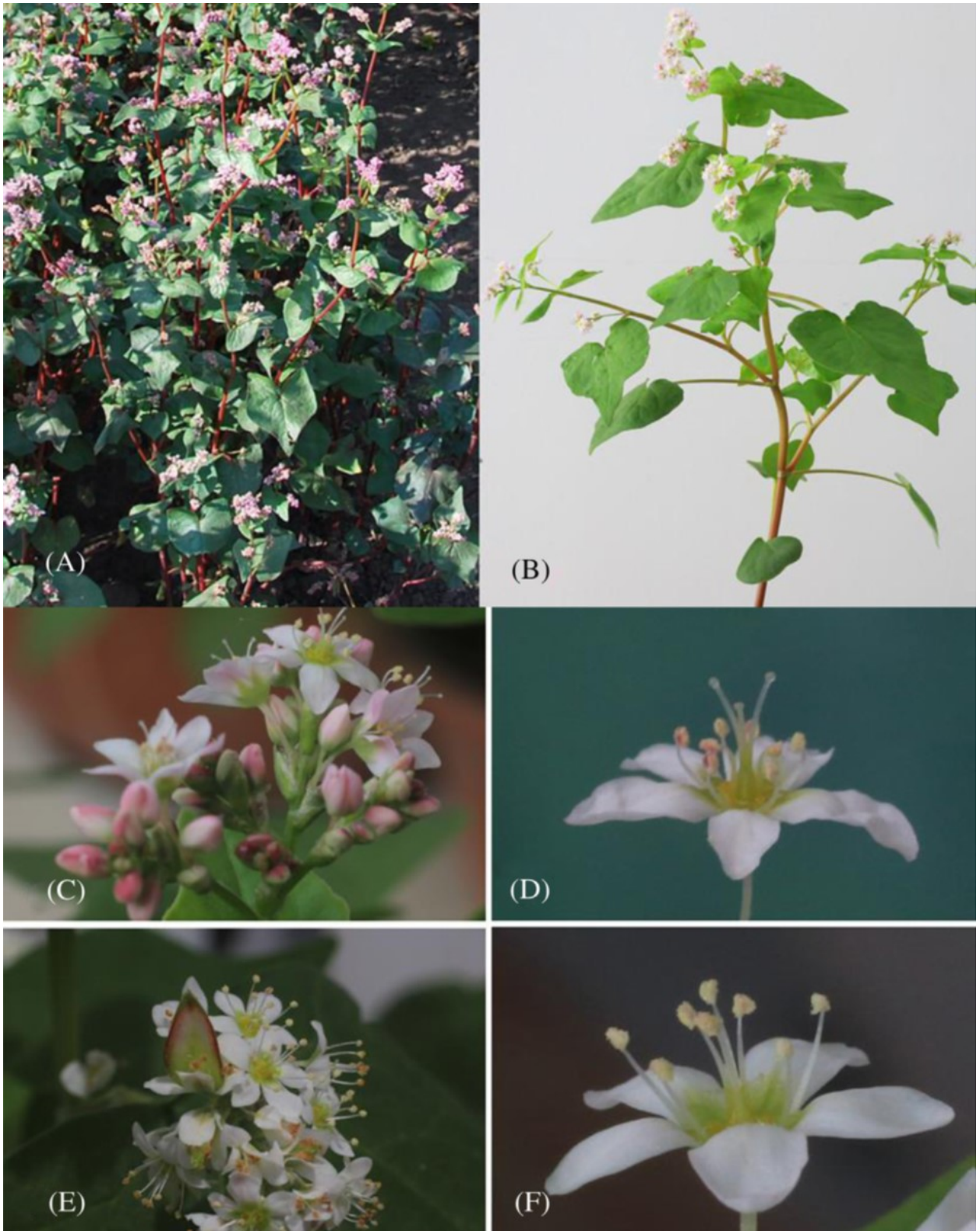


Figure 4 : *Fagopyrum esculentum*. (A) *F.esculentum* en champ.(B) plante unique de *F.esculentum*.

3.2. Sarrasin de Tartarie

Le sarrasin de Tartarie est une plante herbacée annuelle présentant une morphologie similaire à celle du sarrasin commun. C'est une espèce qui présente un état végétatif plus prononcé, qui pousse plus luxurieusement, elle fleurit et mûrit plus tardivement que le sarrasin commun (Schilperoord, 2017). Les plantes du sarrasin de Tartarie ont une croissance plus ramifiée et des feuilles en forme de flèche (figure 6 C). Les tépales verdâtres rendent les fleurs du sarrasin de Tartarie discrètes. Ces fleurs sont d'un blanc jaunâtre ou verdâtre (figure 5E), de 2 mm de diamètre et donc beaucoup plus petites que celles du sarrasin commun, ce qui ne semble donc pas attrayant pour les insectes. Les fleurs sont homomorphiques, autofertiles et cléistogames, avec une pollinisation avant l'ouverture de la fleur (Campbell, 1997 ; Schilperoord, 2017; Zhou et al., 2018), et contrairement au sarrasin commun sa reproduction n'est dépendant d'aucun pollinisateur (Zhu, 2016). Ces graines germent de manière inégale et leur germination est échelonnée (figure 5B), non explosive, ce qui constitue un caractère primitif et montre ainsi que cette espèce n'est pas encore devenue une plante cultivée à part entière (Schilperoord, 2017).



Figure 4 : *Fagopyrum esculentum*. (A) *F.esculentum* en champ.(B) plante unique de *F.esculentum*.

4. Exigences écologiques et intérêts agronomiques du sarrasin

Le sarrasin est une culture annuelle de jours courts et de courte durée, son cycle de vie s'étend sur 3-4 mois (Halbrecq et al., 2005; Jacquemart et al., 2007; Lim, 2013; Quinet et al., 2004). Il

est principalement cultivé pour ses qualités nutritionnelles très élevées. Les conditions environnementales ont des répercussions importantes sur la qualité des grains de sarrasin (Babu et al., 2019; Farooq et al., 2016; Podolska, 2016). Le temps sec et ensoleillé favorise l'accumulation de protéines (Podolska, 2016). En plus d'avoir un impact sur la teneur totale en protéines, les conditions météorologique pendant la période de croissance affectent considérablement la quantité d'acides aminés, la teneur en composés antioxydants, y compris les flavonoïdes, et la teneur en matière grasse (Podolska, 2016). Les températures froides du printemps et de l'automne ne sont pas très appréciées par le sarrasin (Lim, 2013). La croissance optimale se situe donc entre 18-25°C (Jacquemart et al., 2012; Lim, 2013). Il tolère des températures nocturnes dans une fourchette de 5-10°C et journalière jusqu'à 30°C (Lim, 2013; Podolska, 2016).

La température optimale pour la germination est de 10°C (Aubert, 2019; Farooq et al., 2016; Jacquemart et al., 2012; Kalinova & Moudrý, 2003). Cependant, le sarrasin de Tartarie est plus résistant au gel que le sarrasin commun (Campbell, 1997; Hunt et al., 2018; Small, 2017), quant au sarrasin commun il survit bien à des fortes conditions de sécheresse, ce qui n'est malheureusement pas sans risque pour la plante car elle voit sa maturité retarder.

Le sarrasin est principalement cultivé sur des sols sablonneux bien drainés (Williams, 1995) ; néanmoins, il prospère aussi bien dans les sols acides ($\text{pH} < 5$), (Farooq et al., 2016; Hore & Rathi, 2002; Jacquemart et al., 2012). De plus, le drainage doit être tel que la submersion des graines soit évitée car la verse d'eau affectera la germination et réduira ainsi le rendement des cultures (Farooq et al., 2016). Un des avantages agroéconomiques du sarrasin est qu'il est une culture de couverture et ne nécessite donc pas de préparation approfondie du site (Ikanovic et al., 2013); il a la capacité de bien pousser même dans un sol très mal labouré (Farooq et al., 2016; Popovic et al., 2013). De nombreux agriculteurs qui ont utilisé le sarrasin comme culture de couverture font référence à sa capacité à « adoucir » le sol, le laissant dans un état friable et fertile, prêt à être planté.

Le sarrasin est considéré comme une culture intelligente dans les systèmes de cultures intercalaires (Bilal et al., 2013; Farooq et al., 2016) et est associé à la pomme de terre, le soja, le chanvre, le millet, le carthame, tournesol et d'autres plantes annuelles de saison chaude (Pavek & Pullman, 2014). Le sarrasin produit d'abondantes racines fibreuses fines dans les 25 premiers centimètres du sol, qui ameublissent et aèrent le sol, ce qui le rend plus adapté non seulement aux cultures ultérieures, mais aussi au biote du sol (Farooq et al., 2016).

5. Caractéristiques agronomiques

5.1 Semis

La date de semis est l'un des paramètres essentiels pour un meilleur rendement; et dépend de divers facteurs tels que les conditions agro-climatiques comme la température (Farooq et al., 2016; Sobhani et al., 2014). Selon Lee et al. (2001) et Farooq et al. (2016) le rendement de la production de sarrasin en Chine est maximale (2059 kg/ ha) quand les semis sont plantés en fin-mai au lieu de fin avril. Cependant, en Europe occidentale, il est rapporté que la meilleure date de semis est de la mi-mai à juillet (Halbrecq et al., 2005). Cependant, il varie généralement d'un endroit à un autre en raison de sa sensibilité aux conditions de gel. À basse altitude, il est généralement semé entre mai et août, tandis qu'à haute altitude, il est généralement semé entre avril et mai (Farooq et al., 2016; Ratan & Kothiyal, 2011). La profondeur de semis recommandée pour les graines est d'environ 4 à 6 cm, et ses graines sont généralement semées en rangées à environ 10 cm les unes des autres ou dispersées au hasard dans les champs à un taux qui varie de 35 à 40 kg /ha (Farooq et al., 2016).

5.2 Croissance et développement

Une fois le semis effectué, l'émergence de cotylédons peut être observée le deuxième ou le troisième jour. Cette étape dure de 6 à 10 jours, selon les conditions climatiques (Williams, 1995). Après l'émergence, la période de végétation peut commencer, l'épicotyle commence à se développer, les premières feuilles commencent à apparaître et la croissance en longueur se produit à l'endroit où les feuilles sont insérées, donnant lieu à des entre-nœuds (Williams, 1995). Sur la tige, les feuilles se forment aux nœuds et la ramification commence son développement. Le stade de reproduction se produit aux alentours de 20 ou 30 jours après le semis (Williams, 1995). Il produit des inflorescences à l'aisselle des feuilles situées à différents niveaux de la plante (Halbrecq et al., 2005). Ils apparaissent à différents moments et portent de nombreuses fleurs qui continuent d'apparaître pendant de longues périodes. A ce stade la plante est sensible au stress hydrologique et aux gelées. Pendant la maturité physiologique, l'ovaire devient le fruit et l'ovule fécondé se transforme en graine. Cette étape dure de 60 à 70 jours. En même temps, la plante a, à la fois des fleurs et des fruits verts immatures et des fruits mûrs et souvent sur une même inflorescence. À ce stade, les feuilles inférieures tombent, le fruit change de couleur du vert au brun foncé.

5.3 Récolte

La période de récolte varie selon les conditions agroécologiques. Dans certaines régions de haute altitude, le sarrasin est récolté tard dans la saison tandis que dans les régions de moyenne et basses altitudes, il est récolté tôt. L'hétérogénéité de sa maturation due à une floraison persistante rend le moment de la récolte souvent difficile à déterminer (Halbrecq et al., 2005; Quinet et al., 2004). Elle a généralement lieu quand 75% des graines arrivent à maturité (Williams, 1995). Du semis à la récolte, 75 à 80 jours s'écoulent pour les variétés à cycle court et 120 jours pour les variétés à cycle long (Williams, 1995). Pendant la période de récolte, les graines de tous les stades, à savoir les graines mures, les graines immatures et quelques fleurs, sont présentes à la même période. La récolte se fait le matin lorsque la récolte est mouillée de rosée, diminuant ainsi les pertes fracassantes. Après la récolte, les graines sont nettoyées et stockées à 14% d'humidité (Williams, 1995).

6. Utilisations

Outre le fait que le sarrasin soit une pseudo céréale ne contenant pas de gluten donc une alternative, et non des moindres pour toutes les personnes souffrantes de la maladie cœliaque, il est également considéré comme une plante qui possède un haut potentiel nutritionnel (Aguilar et al., 2015; Bonafaccia et al., 2003; Martínez-Villaluenga et al., 2020). Il est donc de nos jours un aliment très important pour l'homme, en particulier dans les pays où un accent particulier est mis sur les aliments sûrs. Ses graines, tiges, feuilles et fleurs sont utilisées pour la nutrition des humains et des animaux. Il a également des bienfaits reconnus dans d'autres domaines telle que la médecine, car il a attiré l'attention des scientifiques de l'alimentation pour ses effets curatifs sur les maladies chroniques (Farooq et al., 2016), ces différents points seront développés par la suite dans ce travail.

6.1 Usage alimentaire

Les pseudo-céréales ont été décrites comme les grains du XXI^e siècle en raison de leur excellente valeur nutritive (Martínez-Villaluenga et al., 2020). Le sarrasin est riche en amidon, fibres, en protéines de haute qualité, sa qualité alimentaire est donc saine et équilibrée (Babu et al., 2019; Farooq et al., 2016; Martínez-Villaluenga et al., 2020; Rodríguez et al., 2020; Suvorova & Zhou, 2018; Tahir & Farooq, 1985). Ils sont également une excellente source de

minéraux (calcium, fer et zinc, potassium (Zhou et al., 2018)), de vitamines (B1, B2, et B6) de lipides, de rutine, d'antioxydants, de quercétrine, quercitrine (Fabjan et al., 2003) de composés phytochimiques tels que les saponines, polyphénols, phytostérols, phytostéroïdes et bétalaïnes avec de potentiels avantages pour la santé (Martínez-Villaluenga et al., 2020).

Selon une étude menée par Fabjan et al., (2003) les graines de sarrasin de Tartarie contiennent plus de rutine (environ 0,8 à 1,7% DW) que les graines de sarrasin commun (0,01% DW). Un inconvénient du sarrasin de Tartarie est son goût amer en raison de la teneur élevée en rutine (Suvorova & Zhou, 2018). Pour réduire son amertume certains agriculteurs utilisent deux techniques, l'une consiste à mettre des gruaux dans de l'eau bouillante comme pour la cuisson du riz ou tremper les gruaux dans de l'eau durant toute une nuit, puis retirer l'eau jaunâtre du dessus (Joshi, 2014; Suvorova & Zhou, 2018). La teneur en rutine et en quercétine des graines de sarrasin de Tartarie dépend principalement de la variété et des conditions de croissance.

Protéines- Le sarrasin contient environ 12 % à 14 % de son poids sec sous forme de protéines (Small, 2017; Steadman et al., 2001). Les protéines du sarrasin *F. esculentum et tartaricum* sont considérées comme des protéines à haute valeur biologique provenant du règne végétal (Martínez-Villaluenga et al., 2020; Small, 2017),

Leur teneur en protéines est similaire à celui du blé, du quinoa, du seigle, mais plus élevée que le riz et l'orge (Alonso-Miravalles & O'Mahony, 2018; Steadman et al., 2001). Les protéines de sarrasin contiennent tous les acides aminés essentiels tels que la méthionine, la cystéine et la lysine qui est un acide aminé limité dans les céréales communes et secondairement déficientes en thréonine et tryptophane (Martínez-Villaluenga et al., 2020; Motta et al., 2019; Steadman et al., 2001). Ainsi, le sarrasin est nutritionnellement supérieur aux céréales en termes d'équilibre en acides aminés (Radovic et al., 1999; Steadman et al., 2001). Toutefois il convient de préciser que la qualité des protéines ne doit pas seulement tenir compte de la composition en acides aminés, mais aussi de la digestibilité et de l'absorption des produits d'hydrolyse produits dans le tractus gastro-intestinal humain. Le score d'acides aminés corrigé de la digestibilité des protéines (PDCAAS) est largement utilisé comme indicateur de la qualité nutritionnelle des protéines (Martínez-Villaluenga et al., 2020).

Une deuxième composante biochimique, DIAAS (Digestible Indispensable Amino Acid Score), est utilisé pour la caractérisation des protéines dans différents aliments et correspond exactement aux vraies valeurs de digestibilité idéale des acides aminés déterminées in vivo chez l'homme adulte. Plus élevé est le score de digestibilité des acides aminés indispensables, plus

la digestibilité est élevée dans l'organisme. Il a été rapporté, d'après l'analyse de différents DIAAS faite par Han et al. (2019), que le score du sarrasin commun est de 68 contre 47 pour le sarrasin de Tartarie, ce qui fait d'eux des meilleures sources de protéines pour la consommation humaine que le blé, le riz brun, l'avoine, et le riz poli qui ont respectivement des scores de 20, 42, 43 et 37. Il convient aussi de noter que la teneur en protéines peut varier d'un état à un autre, la farine de sarrasin a une teneur en protéines qui peut varier de 8.5 -19% tandis que celle des graines peut varier de 12-14% .

Glucides- Les glucides sont les principaux composants nutritionnels des pseudo-céréales, leur composition oscille entre 60 et 80% du poids sec des graines (Lim, 2013; Martínez-Villaluenga et al., 2020; Rodríguez et al., 2020; Shukla et al., 2018), et l'amidon est le principal glucide du sarrasin ; il constitue environ 54-55% du poids sec total des graines (Martínez-Villaluenga et al., 2020; Repo-Carrasco-Valencia et al., 2010). L'amidon de sarrasin a une teneur en amylose relativement plus élevée (18,3-47% de l'amidon total) que le quinoa (11-12% de l'amidon total) et l'amarante (7,8-34,3% de l'amidon total) (Repo-Carrasco-Valencia et al., 2010).

L'amidon est un nutriment qui est classé sous différentes formes : rapidement digestible, lentement digestible ou résistant, selon la facilité avec laquelle il se décompose dans l'intestin. Parmi les pseudo-céréales, le sarrasin commun et le sarrasin de Tartarie ont les niveaux les plus élevés d'amidon résistant (27-33,5%) (Skrabanja et al., 1998; Han et al., 2019; Zhou et al., 2019). Toutefois, l'amidon résistant est considéré comme offrant des avantages pour la santé car il ne peut pas être digéré et absorbé dans l'intestin grêle mais atteignant le côlon où il est lentement fermenté par des micro-organismes pour produire des acides gras à chaîne courte (Lehmann & Robin, 2007). L'amidon résistant a également d'autres bénéfices sur la santé tels : 1) la modulation des niveaux de glucose et de lipides sanguins, 2) la régulation du microbiote intestinal, et 3) la réduction de l'obésité (Martínez-Villaluenga et al., 2020; Zhou et al., 2019)

Le sarrasin est une excellente source de **fibres alimentaires**, sa teneur totale en fibres varie de 10 à 17,8% comparativement à de 7,0 à 26,5% pour le quinoa, et de 2,7 à 17,3% pour l'amarante (Joshi et al., 2019). La quantité totale en fibres du sarrasin est comparable à celle des autres grains de céréales. Les fibres alimentaires du sarrasin sont composées de 6,79% de lignine, 2,22% d'hémicellulose et 10,64% de cellulose (Dziedzic et al., 2016)

Lipides - On retrouve les lipides dans les céréales et dans les pseudo-céréales mais dans une petite proportion (Qin et al., 2010; Sinkovič et al., 2020; Wijngaard & Arendt, 2006). La teneur

en lipides des grains de sarrasin commun et de Tartarie est assez similaire et varie de 1 à 5% selon le génotype (Sinkovič et al., 2020), avec la plupart des substances lipidiques concentrées dans la fraction de son (Bonafaccia et al., 2003). Le sarrasin est une source d'acides gras insaturés et polyinsaturés (Peng et al., 2013; Sinkovič et al., 2020), ces acides gras régulent d'importantes fonctions chez l'homme, telles que le métabolisme lipidique et cardiovasculaire (Maki et al., 2018; Sinkovič et al., 2020). Les principaux acides gras présents dans les graines de sarrasin sont l'acide oléique et l'acide linoléique (Gulpinar et al., 2012), l'acide palmitique s'est révélé être le principal acide gras saturé.

Actuellement, divers produits de sarrasin comme le thé, les gruaux grillés, la farine, les biscuits, les nouilles, les crêpes, les gâteaux et le vin sont disponibles sur le marché (Farooq et al., 2016; Small, 2017).

6.2 Usage médical

Vitamines et minéraux - Les graines de sarrasin sont de bonnes sources de minéraux (Cu, K, Ca, P, Fe, Mg) (Ikanovic et al., 2013; Lim, 2013; Rodríguez et al., 2020; Steadman et al., 2001; M. Zhou et al., 2018). Dans une étude comparative menée par Bonafaccia et al., (2003) il a été observé que les graines de sarrasin de Tartarie contenaient des niveaux de minéraux plus élevés que le sarrasin commun. Les principaux minéraux contenus dans le sarrasin sont : le potassium, le magnésium et le phosphore. La teneur en vitamines du sarrasin (*F. esculentum* et *tartaricum*) est également intéressante, sa farine contient des niveaux élevés de vitamines B1 (thiamine), B2 (riboflavine), B3(niacine) et B6 (pyridoxine) (Lim, 2013).

Les antioxydants sont des composés chimiques qui réduisent les potentiels dommages causés par les radicaux libres dans l'organisme. Les radicaux libres sont des molécules très réactives qui sont impliquées dans l'apparition de certaines maladies cardiovasculaires, et d'autres maladies liées au vieillissement. Dans une étude comparant la composition du sarrasin à celle de quatre céréales (l'orge, le blé, le seigle et l'avoine), Zieliński et Kozłowska (2000) ont montré que le grain de sarrasin entier se situait au premier rang quant à son contenu en composés phénoliques et sa capacité antioxydante. Le sarrasin a donc acquis une importance mondiale en raison de la présence de nombreux constituants bioactifs importants tels que la rutine, les 4 C-glycosylflavones (l'orientine, la vitexine, l'isovitexine et l'isoorientine) et la quercétine (Han et al., 2019; Kim et al., 2008). En plus d'autres composants essentiels comme les fagopyritols qui trouvent un vaste potentiel de contrôle glycémique chez les diabétiques de type II et des effets cardiovasculaires positifs, le sarrasin améliore le traitement de la maladie cœliaque et la prévention des calculs biliaires et de plusieurs tumeurs hormono-dépendantes (Farooq et al.,

2016; Lehmann & Robin, 2007; Lim, 2013; Repo-Carrasco-Valencia et al., 2010). Il est important de préciser que le sarrasin de Tartarie contient plus de flavonoïdes telle la rutine que le sarrasin commun. La teneur en rutine dans les graines de sarrasin de Tartarie représente 90% de la teneur totale en composés phénoliques et seulement 20% dans les graines de sarrasin commun (Kim et al., 2008).

Selon les récents rapports de Peng et al. (2013) et Lee et al. (2013), un autre composé fonctionnel, l'émodyne (1,3,8-trihydroxy-6-méthylanthraquinone), qui appartient aux anthraquinones, est présent dans le sarrasin de Tartarie et joue un rôle majeur dans la prévention du diabète de type II et la réduction du poids.

B. Impact du changement climatique sur l'agriculture

Aujourd'hui, le réchauffement climatique et ses effets sont sans équivoques et, depuis les années 1950, les changements observés sont sans précédents (André et al., 2008; Besancenot et al., 2019). Au cours des trois dernières décennies, l'évolution observée du climat, quelles que soient ses causes, a eu un impact sur l'atmosphère, les océans se sont réchauffés, la couverture de neige et de glace a diminué, le niveau des mers s'est élevé et les concentrations des gaz à effet de serre ont augmenté, d'où les répercussions sur les systèmes naturels et humains, et également sur l'agriculture. Ces impacts climatiques ont donc été observés sur tous les continents, ce qui témoigne de la sensibilité de ces systèmes au changement climatique (Dahan Dalmedico & Guillemot, 2006; Duong, 2000).

En général, en termes de croissance, la température est le facteur de production environnemental le plus important. Ces hausses de températures influencent d'ores et déjà et continueront d'influencer nos cultures, car celles-ci sont immobiles et devraient donc s'adapter aux conditions de la météo et du sol. Elles ont donc mis au point divers mécanismes de thermo tolérance leur permettant d'y faire face. (Nahar et al., 2015). Le stress hydrique a des conséquences surtout au niveau de la reproduction chez le sarrasin, car il a besoin de suffisamment d'eau pour atteindre un bon rendement, et pour éviter les pertes trop importantes d'eau, les plantes mettent en place des mécanismes pour éviter les pertes trop importantes d'eau. Dans la suite de cette étude nous verrons comment les hausses de températures et le stress hydrique affectent la culture du sarrasin et comment il se défend pour sa survie.

1. Impact du stress thermique sur la culture du sarrasin

La culture du sarrasin est principalement réalisable sous les climats tempérés (Farooq et al., 2016). La température est un facteur et non des moindres qui affecte le développement et la fertilité des structures reproductrices, en particulier pendant la période de floraison (Halbrech et al., 2005; Lachmann & Adachi, 1990). Pendant la floraison, et dans la phase de maturation des graines la température de l'air doit être comprise entre 17 et 19 °C. En dessous de 15 °C, la floraison est inhibée avec une initiation retardée et une réduction du nombre de fleurs (Farooq et al., 2016; Lehmann & Robin, 2007). Slawinska et Obendorf (2001) ont rapporté qu'une température basse de 10 °C induit un flétrissement précoce des fleurs. Dans le même temps, des températures au-delà de 30°C et des vents secs ont un impact négatif provoquant l'avortement des fleurs, le flétrissement et la malformation du sac embryonnaire, de plus, la viabilité du grain de pollen dépend également de la température et de l'humidité (Farooq et al., 2016).

2. Impact du stress hydrique sur la culture du sarrasin

Les besoins en eau du sarrasin sont assez élevés (Jacquemart et al., 2012; Podolska, 2016). Pendant la floraison et la formation des grains, le sarrasin consomme de 15 à 20 fois plus d'eau qu'aux premiers stades de son développement (Podolska, 2016).

Il a été révélé que pour produire 1 kg de graines, le sarrasin nécessite environ 225 à 315 kg d'eau (Farooq et al., 2016; Jacquemart et al., 2012). En raison de son système racinaire peu profond il subit rapidement un flétrissement dans des conditions de sécheresse (Campbell, 1997; Farooq et al., 2016). Les contraintes hydriques appliquées pendant la phase végétative sont moins néfastes que lorsqu'elles sont imposées aux plantes engagées dans la phase de reproduction (Jacquemart et al., 2012) Cependant, la réhydratation a lieu rapidement lorsque les conditions normales de l'eau sont rétablies et que la croissance reprend (Delpérée et al., 2003). Pendant la floraison et la formation des graines, un approvisionnement limité en eau ne convient pas au développement de l'endosperme et peut provoquer un avortement embryonnaire (Farooq et al., 2016; Jacquemart et al., 2012). La perte de fertilité peut entraîner une baisse de rendement de 50% (Farooq et al., 2016). L'excès d'eau, soit par inondation de surface ou par saturation à quelques centimètres sous la surface, est également dommageable au rendement du sarrasin (Jacquemart et al., 2012) et dans une étude de Sugimoto et Sato (2000), il a été rapporté qu'une inondation de plus de 10 jours au stade de floraison ou de plus de 3 jours au stade de maturation affecte le poids des graines.

II. Matériels et méthodes

A. Qualités nutritionnelles des graines de sarrasin commun et de Tartarie

Matériel végétal et conditions de culture

Pour cette première étude portant sur qualité nutritionnelle, les graines de quatre variétés seront analysées et comparées : deux variétés de sarrasin commun, la Harpe et Darja, et deux variétés de sarrasin de Tartarie, Izlek et Zlata. Ces graines proviennent d'un essai fait en champ sur la ferme de Marbaix (Centre Alphonse de Marbaix à Corroy le Grand) en Belgique. Les semis ont été réalisés le 22 mai 2019 à une densité de 37 kg/ha pour le sarrasin commun et 30 kg/ha pour le sarrasin de Tartarie. La récolte a quant à elle été effectuée le 17 septembre 2019.

Pour ces quatre variétés, nous avons estimé le poids de 1000 grains et avons réalisé le dosage des protéines, des acides aminés et des minéraux dans les graines.

1. Paramètre de rendement (poids des 1000 graines)

Le poids des 1000 graines est un paramètre important surtout pour la sélection des variétés, en vue de caractériser la densité et la grosseur des grains. Afin d'estimer le poids de 1000 grains, nous avons mesurer le poids de 100 graines de chaque variété en triplicats et ensuite multiplié le poids obtenu par 10 afin d'avoir le poids de 1000 graines pour les quatre variétés.

a. Dosages des protéines

Pour déterminer les teneurs en protéines, 1g de chaque échantillon a été préalablement pesé et mélangé sur un papier filtre exempt d'azote de 15 cm de diamètre. Les échantillons ont ensuite été mélangés à environ 8 g de Sélénium (Se) et digérés dans 25ml l'acide sulfurique (H_2SO_4) et 30 gouttes de $C_2H_16O_2$. Le sélénium (Se) a été utilisé comme catalyseur pour raccourcir le temps de digestion, et les sels sulfates comme élevateurs du point d'ébullition de l' H_2SO_4 , pour libérer l'azote des protéines et retenir l'azote sous forme de sulfate d'ammonium ($(NH_4)_2SO_2$), le reste étant dissout. Ensuite, l'unité de distillation Buchi K-355 à été mise en marche, et de l'hydroxyde de sodium (NaOH) concentré a été ajouté pour libérer de l'ammoniac (NH_3) qui fut distillé, puis collecté dans 10 ml d'une solution d'acide faible (H_3BO_3 -acide borique) et mise au trait à 100ml avec de l'eau distillée. Pour finir, la solution réceptrice H_3BO_3 est titré avec un acide fort (HCL-acide chlorhydrique) standard filtré 0.1000 N jusqu'au virage neutre vers le rose-orange. Les dosages ont été réalisés en triplicats pour chaque variété.

b. Dosage des minéraux

50 à 100 mg de graines ont été pesés et placés dans des fioles jaugées de 10 mL où ont été ajoutés 4 mL d'acide nitrique à 35%. Le mélange a été chauffé sur bain de sable jusqu'à évaporation complète de l'acide nitrique et dissolution complète de la matière organique. Les résidus minéraux ont été solubilisés complètement par chauffage dans 2 mL d'eau régale (acide chlorhydrique et acide nitrique) avec refroidissement et ajout d'eau déminéralisée pour obtenir un volume total de 10mL. Après filtration avec un papier filtre Whatman, le dosage des teneurs en K, Mg, Cu, Fe, Zn dans la solution est effectué par spectroscopie à absorption atomique de la marque Fisher Scientific. Les teneurs données en ppm ont ensuite été converties en mg/ kg de matière sèche. Les dosages ont été réalisés en triplicatas pour chaque variété.

c. Dosage des acides aminés

Pour le profil en acides aminés, deux procédures ont été réalisées en parallèle pour chacun des 3 répliques biologiques par variété. Pour chaque réplique, le dosage a été fait à partir de 200 mg de graines. Pour chacune des 2 procédures, un tube dans lequel l'échantillon a été remplacé par du BSA a servi de contrôle et des droites de calibration d'une gamme allant de 10 μ M à 100 μ M ont été réalisées pour chaque acide aminé.

La première procédure (procédure A) a permis le dosage de tous les acides aminés sauf la méthionine, la cystéine et le tryptophane. Cette procédure a consisté en une hydrolyse acide des liaisons peptidiques par ajout de 1,5 mL d'une solution de phénol (0,1%)-HCl 6M aux graines préalablement pesées et broyées. Après incubation à 110°C pendant 18 heures, le volume a été porté à 10 mL par ajout d'eau distillée. La deuxième procédure (procédure B) a permis le dosage de la méthionine et de la cystéine qui ont été respectivement transformées en méthionine sulfone et en acide cystéique. Lors de cette procédure, l'hydrolyse acide décrite ci-dessus a été précédée d'une oxydation par ajout de 0.5 mL d'une solution d'acide performique (5 mg de cristaux de phénol dans 0,5 mL d'H₂O₂ 33% et 4,5 mL d'acide formique 88%) aux graines préalablement pesées et broyées. Après incubation durant 18h dans un bain de glace, la réaction a été arrêtée par ajout de 0,084 g de métabisulfite avant la réalisation de l'hydrolyse acide.

Après hydrolyse acide, 100 μ L de chacune des solutions des procédures A et B ont été transférés dans une fiole HPLC auxquels 100 μ L de tampon borate 0,1 M pH 10,4 et 800 μ L d'eau déminéralisée ont été ajoutés. Une double dérivation a été réalisée après la pré-colonne via l'injecteur automatique (Agilent 1200 series). Une première dérivation à l'aide d'une solution de 2-mercaptoéthanol (4%) et d'orthophtaldialdéhyde (25 mg OPA dissout dans 0,5

ml de méthanol, porté à 5 ml avec un tampon borate 0,1 M pH 10,4) a permis de visualiser la majorité des acides aminés excepté les acides aminés cycliques (proline et hydroxyproline) qui ont nécessité une deuxième dérivatisation à l'aide d'une solution de Fmoc (0,25 % dans l'acétonitrile). Les échantillons injectés ont été séparés sur une colonne Zorbax Eclipse plus 3,5 μm , 150 \times 2,1 mm (Agilent), à 40°C à l'aide de 2 phases mobiles (Eluant A : Tampon phosphate 40 mM à pH 8,4 / Eluant B: acétonitrile/méthanol/ eau (45:45:10 v/v/v)) à un débit de 0,42mL/min. Le gradient de départ était de 0 % de B pendant 0,5 min, puis est monté progressivement à 57 % de B en 25 min avec maintien de ce pourcentage pendant 5 min. La colonne a ensuite été lavée avec 100% de B et rééquilibrée à 0 % de B. Les acides aminés dérivatisés à l'OPA ont été détectés en fluorimétrie à une longueur d'onde d'excitation de 350 nm et une longueur d'onde d'émission de 450 nm, et les acides aminés dérivatisés à l'aide de Fmoc ont été détectés en fluorimétrie à une longueur d'onde d'excitation de 260 nm et une longueur d'onde d'émission de 325 nm.

B. Impact du stress thermique et hydrique sur la culture du sarrasin de Tartarie

Matériel végétal et conditions de culture

La deuxième expérience de ce mémoire s'est déroulée en serres, uniquement sur deux variétés de sarrasin de Tartarie ; Izlek et Zlata. Les graines de la variété « Izlek » viennent du Luxembourg (Grand-Duché) et ont été fournies par Monsieur Christian Zewen; quant aux graines « Zlata », elles sont originaires de Slovénie et ont été fournies par le Professeur Ivan Kreft de l'université de Ljubljana.

Le 29 octobre 2019, 120 graines ont été semées, soit 60 graines de chaque variété, dans des bacs de semis contenant du terreau (substrat d'argile n° 9 eleve, DCM). Pour garantir et maintenir l'humidité nécessaire pour la germination, ils ont été recouverts chacun d'une vitre et transférés ensuite en serre. La température de la serre fut de 21,4°C pour une humidité moyenne de 55% et une photopériode de 16h. L'éclairage de la serre a été assuré par des lampes LED LumiGrow pro 650 Watts avec une intensité moyenne de 120 $\mu\text{moles}/\text{m}^2\text{s}$.

Le 12 novembre 2019, seules les plantules ayant germé ont été transférées dans des pots individuels de 14 cm de diamètre avec le même terreau et replacées dans la même serre tempérée. Trois jours plus tard, le 15 novembre 2019, les différents traitements ont été appliqués à savoir : 21°C contrôle, 21°C stress hydrique, 28°C contrôle et 28°C stress hydrique. Pour ce faire, 28 plantes par variété ont été mises dans une serre à $21 \pm 1^\circ\text{C}$ (jour) et $18 \pm 1^\circ\text{C}$ (nuit) à une humidité moyenne de 55%, 14 plantes ont été arrosées tous les 2 jours (pour éviter une teneur en eau du sol de moins de 15-20 %) et les 14 autres ont été mises en stress hydrique.

Pour les traitements à haute température, 28 plantes par variété ont été placées dans une serre distincte, cette fois-ci à $29,1 \pm 1^\circ\text{C}$ (jour) et $27,6 \pm 1^\circ\text{C}$ (nuit), pour une humidité moyenne de 50% et 14 plantes par variété ont été arrosées tous les 2 jours (teneur en eau du sol $> 15-20\%$) tandis que 14 autres étaient soumises à un stress hydrique. L'expérience a duré au total 85 jours pour la variété « Zlata » et 75 jours pour « Islek ». Etant donné une importante mortalité des plantes à haute température, le 5 décembre 2019, 40 graines de chaque variété ont été semées à nouveau dans les mêmes conditions que précédemment. Vingt-quatre plantules ont été repiquées le 18 décembre 2019 et placées le 23 décembre en serre à 29°C (10 plantes par variété) pour augmenter la quantité de plantes soumises à haute température et ainsi compenser les pertes des premiers semis.

1. Mesures non destructives

Dès la mise en serres, et durant les 1^{ère}, 2^{ème}, 3^{ème}, 6^{ème}, 7^{ème} semaines après le début du traitement (15 novembre 2019) et 9^{ème} semaine mais uniquement pour « Zlata », des mesures non destructives ont été prises pour suivre l'évolution morphologique et physiologique des plantes.

a. Mesures morphologiques

Chaque semaine, les comptages suivants ont été réalisés sur 7 plantes par variété et traitement.

- ❖ Nombre total de feuilles par plante : seules les feuilles déroulées ont été prises en compte, laissant de côté les cotylédons, les jeunes feuilles en formation.
- ❖ Nombre total d'inflorescences par plante
- ❖ Nombre total d'inflorescences en graines par plante
- ❖ Nombre total d'inflorescences en fleurs : seules les inflorescences qui présentaient des fleurs complètement ouvertes ont été comptées.

Les mesures suivantes ont été prises une seule fois en fin d'expérience :

- ❖ Nombre total de ramifications sur la plante : le nombre de tiges secondaires sur la tige principale.
- ❖ Nombre de nœuds sur la tige principale.
- ❖ Taille : cette mesure a été prise à l'aide d'un mètre placé depuis le sol jusqu'à l'inflorescence terminal.

- ❖ Surface foliaire : toutes les surfaces des feuilles du 7^{ième} nœud de toutes les plantes restantes furent prises et collées sur une feuille de papier ensuite scannées et mesurées avec le logiciel ImageJ.

b. Mesures physiologiques

Après le début du stress (17 décembre 2019 et 13 janvier 2020), deux paramètres physiologiques qui sont liés à la photosynthèse et au statut hydrique de la plante ont été analysés sur une jeune feuille complètement étalée de 3 plantes par variété et traitement. Les plantes choisies différaient des plantes utilisées pour les mesures morphologiques.

- ❖ IRGA (InfraRed Gas Analyser) afin de quantifier la photosynthèse nette instantanée (A_i), la transpiration instantanée (E_i), la conductance stomatique instantanée (g_s) et la concentration intercellulaire en CO_2 (c_i). Toutefois avant de commencer les mesures, il doit être calibrer, en laissant la pince ouverte, après calibrage les mesures sont prises en plaçant simplement la feuille dans la pince.
- ❖ Chlorophyllomètre (SPAD, Opti-sciences CCM 200) afin de mesurer la teneur en chlorophylle au niveau des feuilles. Ces valeurs sont sans unité. Avant utilisation, il doit être calibré en refermant la pince sur elle-même. La feuille est ensuite placée sous la pince. Pour chaque feuille quatre mesures ont été moyennées

2. Mesures destructives

a. Poids frais, poids sec et teneur en eau

Les plantes ont été récoltées après 75 jours pour Izlek et 85 zлата. Le poids frais des différents organes de 3 plantes par condition (tige, feuilles, inflorescences, graines vertes et graines brunes) a été déterminé, ensuite ces organes ont été déposés dans des enveloppes qui furent mises à sécher en étuve à 60°C pendant 72h. Par la suite, le poids sec a été déterminé après pesée sans enveloppe des différents organes. À l'aide du poids frais et du poids sec, les teneurs en eau (WC) ont été calculées grâce à la formule : $WC = ((\text{poids frais} - \text{poids sec}) / \text{poids frais}) * 100$.

3. Analyses statistiques

Les analyses ayant trait à la qualité nutritionnelle des graines ont été faites sur le logiciel XLSTAT. Un test de Shapiro-Wilk a permis de tester la normalité des données et des tests de Levene ont analysé l'homoscédasticité des données. Des modèles d'Anova à un facteur ont été réalisés pour tester l'effet des espèces et ensuite des variétés sur le poids de 1000 graines et les

teneurs en minéraux, protéines et acides aminés. Dans la suite, les analyses concernant le suivi de la croissance morphologique et du statut physiologique des variétés de sarrasin de Tartarie soumises au stress thermique et hydrique ont été réalisées avec le logiciel JMP. Des modèles Anova à 3 facteurs (variété, température, et traitement hydrique) ont été utilisées pour tester l'effet de chacun de ces 3 facteurs et leurs interactions sur les différents paramètres mesurés. Pour chaque variété, des Anova à 2 facteurs testant l'effet de la température, du stress hydrique et de leur interaction sur la croissance morphologique et le statut physiologique ont aussi été réalisées.

III. Résultats

Qualité nutritionnelle des graines de sarrasin commun et de Tartarie

1. Poids de 1000 grains des graines de sarrasin

La différence de poids entre les 2 espèces était très significative ($F=23,902$, $p=0,001$, Tableau 1) ; les graines du sarrasin commun présentaient un poids plus élevé que celles du sarrasin de Tartarie. Cette variation de poids continuait à s'observer même entre les différentes variétés. Chez le sarrasin de Tartarie, le poids des graines de Zlata était plus élevé que le poids des graines d'Izlek ($F= 12,007$, $p=0,026$). Même constat pour les 2 variétés du sarrasin commun, les graines de La Harpe avaient un poids plus élevé que celles de Darja ($F=9,954$, $p=0,034$).

Tableau 1 : Poids de 1000 grains chez le sarrasin commun et le sarrasin de Tartarie

Variété	Poids 1000 graines (g)
Sarrasin commun	
Darja	27,511 ± 0,362
La Harpe	36,097 ± 4,700
Sarrasin de Tartarie	
Izlek	19,265 ± 0,745
Zlata	21,443 ± 0,794

2. Teneurs en minéraux dans les graines de sarrasin commun et de Tartarie

Quelle que soit l'espèce et la variété, les concentrations en K et en Mg étaient supérieures aux teneurs en Cu, Fe et Zn dans les graines de sarrasin (tableau 2). La concentration en minéraux des graines était assez similaire entre les deux espèces étant donné que seule la concentration

en Mg variait (Mg : F = 14,12, p = 0,0037 ; p>0,5 pour K, Cu, Fe et Zn) et était supérieure chez le sarrasin commun par rapport au sarrasin de Tartarie. En ce qui concerne le sarrasin commun, les graines de La Harpe étaient plus riches en K (F = 20,99, p = 0,0102) mais plus pauvres en Cu que les graines de Darja (F = 31,67, p = 0,0049). Les teneurs en Fe et en Zn étaient très variables au sein d'une même variété chez cette espèce. Pour les variétés du sarrasin de Tartarie, les concentrations en Zn (F = 10,78, p = 0,0304) et en Mg (F = 13,89, p = 0,0203) étaient plus élevées chez Zlata que chez Islek et les teneurs en Fe étaient fort variables entre répliques chez Zlata.

Tableau 2 : Teneurs en minéraux de graines de sarrasin commun et de Tartarie

Variété	K (mg/g)	Mg (mg/g)	Cu (µg/g)	Fe (µg/g)	Zn (µg/g)
Sarrasin commun					
La Harpe	5,64 ± 0,33	1,77 ± 0,07	3,33 ± 0,73	4,44 ± 6,33	17,09 ± 14,72
Darja	4,47 ± 0,29	1,60 ± 0,16	6,86 ± 0,80	5,22 ± 9,03	27,19 ± 18,19
Sarrasin de Tartarie					
Zlata	4,54 ± 0,10	1,49 ± 0,06	4,33 ± 2,38	8,69 ± 15,05	17,08 ± 4,42
Islek	4,44 ± 0,15	1,29 ± 0,08	4,39 ± 1,65	3,64 ± 3,74	8,62 ± 0,61

3. Teneurs en protéines dans les graines de sarrasin commun et de Tartarie

Le dosage des protéines a montré une différence significative entre les 2 espèces du sarrasin et avec une teneur plus élevée chez le sarrasin commun (F=17,29, p=0,002, Tableau 3). Chez le sarrasin de Tartarie, la teneur était très similaire entre les variétés Izlek et Zlata (F = 0,600, p= 0,482). Il en va de même pour les variétés du sarrasin commun. La différence entre la teneur en protéines de La Harpe et Darja n'était pas significative (F= 2,947, p= 0.161).

Tableau 3 : Teneurs en protéines de graines de sarrasin commun et de sarrasin de Tartarie

Variété	Teneur en protéines (g/g MS)
Sarrasin commun	
Darja	0,152 ± 0,016
La Harpe	0,176 ± 0,017
Sarrasin de Tartarie	
Islek	0,129 ± 0,014
Zlata	0,122 ± 0,023

4. Teneurs en acides aminés dans les graines de sarrasin

Cette analyse s'est portée sur 6 acides aminés essentiels : l'histidine, la thréonine, la méthionine, la valine, l'isoleucine, la leucine, la lysine et 9 acides aminés non essentiels : la cystéine, la glutamine, la sérine, la glycine, la tyrosine, l'arginine, l'alanine, la proline. Les teneurs de ces

différents acides aminés étaient quasi-identiques entre les 2 espèces de sarrasin excepté ceux observés chez la proline ($F= 6,353$, $p=0.03$) dont la teneur était plus élevée chez le sarrasin de Tartarie (Tableau 4). Concernant les 2 variétés du sarrasin commun, les teneurs en acides aminés étaient approximativement égales sauf la teneur en proline qui était plus élevée chez la variété Darja ($F=10.321$, $p=0.033$). En revanche, chez les variétés du sarrasin de Tartarie, on a observé une variation des teneurs un peu plus importante, Zlata s'est montrée plus riche en glutamine ($F=9,496$, $p=0.037$), arginine ($F=12,915$, $p=0.023$) et méthionine ($F=22,231$, $p=0.009$) que Izlek.

Tableau 4 : Teneurs en acides aminés dans les graines de sarrasin (mg/g MS)

AA/Variété	Sarrasin commun		Sarrasin de Tartarie	
	Darja	La harpe	Izlek	Zlata
Asparagine	7,866 ± 0,368	7,033 ± 0,513	7,466 ± 0,503	8,167 ± 0,321
Cystéine	2 ± 0,608	1,966 ± 0,152	2,1 ± 0,1	2,4 ± 0,264
Glutamate	18,416 ± 1,818	16,617 ± 1,361	17,517 ± 1,201	17,517 ± 1,201
Sérine	4,883 ± 0,362	4,667 ± 0,143	4,767 ± 0,131	4,95 ± 0,312
Histidine	2,216 ± 0,160	2,167 ± 0,144	2,053 ± 0,105	2,167 ± 0,152
Glycine	6,9 ± 0,492	6,367 ± 0,333	6,6 ± 0,304	7,233 ± 0,425
Threonine	4,417 ± 0,332	4 ± 0,278	4,133 ± 0,189	4,583 ± 0,208
Arginine	10,367 ± 0,900	9,483 ± 0,361	9,25 ± 0,312	10,483 ± 0,505
Methione	1,6 ± 0,458	1,467 ± 0,416	0,9 ± 0,346	2,033 ± 0,231
Alanine	5,217 ± 0,355	4,817 ± 0,202	5,017 ± 0,236	5,533 ± 0,246
Tyrosone	1,767 ± 0,115	1,867 ± 0,231	2,067 ± 0,153	2 ± 0,1
Valine	3,2 ± 0,264	2,917 ± 0,382	3,45 ± 0,132	3,183 ± 0,165
Isoleucine	2,683 ± 0,175	2,55 ± 0,173	2,633 ± 0,104	2,833 ± 0,126
Leucine	5,85 ± 0,35	5,367 ± 0,368	5,717 ± 0,325	6,367 ± 0,333
Lysine	2,867 ± 0,237	3 ± 0,4	2,833 ± 0,160	3,8 ± 0,996
Proline	2,3 ± 0,264	1,733 ± 0,153	1,933 ± 0,115	2,4 ± 0,656

Impact des stress thermique et hydrique sur le sarrasin de Tartarie

1. Croissance végétative

Durant toute la durée de l'expérience, l'on a observé chez les 2 variétés Izlek et Zlata une production de feuilles aux 2 températures (21° et 29°C). Même si en début de culture le rythme d'apparition des feuilles était plus important chez la variété Izlek (figure 6 et 7), la variété Zlata a produit en fin de culture plus de feuilles qu'Izlek. La production des feuilles a été plus abondante à 21°C chez la variété Izlek et à 29°C chez la variété Zlata. Au sein de la variété Zlata, l'effet du stress hydrique fut observé conjointement à 21°C et à 29°C.

Chez la variété Izlek, un pic de production de feuilles est observé à 21°C chez les plantes témoins et stressées 3 semaines après le traitement, avec un effet significatif de la température à cette date ($F= 47.17$, $p < 0.0001$). On a observé par la suite, une chute progressive de feuilles à 21°C, sans doute due à la senescence. Cependant, le stress hydrique n'a eu aucun impact à 21°C. La production des feuilles à 29°C était par contre plus faible et stable tout au long de l'expérience. A cette température, le stress hydrique a réduit le nombre de feuilles durant la 1^{ère} semaine ($F= 31.53$, $p=0.0001$) et la 3^{ième} semaine ($F= 9.33$, $p=0.011$) avec une production de feuilles qui restait constante chez les plantes témoins et stressées. La variété Zlata quant à elle, a montré une certaine particularité ; sa production de feuilles fut continue et progressive tant à 21°C qu'à 29°C mais plus importante à 29°C ($F= 25.91$, $p=0.0007$). Durant toute l'expérience, les plantes soumises à 21°C furent impactées par le stress hydrique avec une production de feuilles plus élevée chez les plantes stressées en début de culture ($F=21.29$, $p=0.0001$). A 29°C, l'impact du stress hydrique s'est fait ressentir dès le début de la culture (S1, $F= 24.53$, $p=0.0086$) et s'est accentué avec le temps (S3, $t= -16.78$, $p < 0.000$; S8, $t= -10.24$, $p < 0.0001$) avec une production plus faible chez les plantes stressées. Cette différence de l'effet du stress hydrique entre températures explique l'effet significatif de l'interaction en 1^{ière} semaine (Interaction : $F=12.79$, $p < 0.00017$), 3^{ième} semaine (Interaction : $F=77.94$, $p < 0.0001$) et 6^{ième} semaine (Interaction : $F= 32.69$, $p < 0.0001$) après le début du traitement.

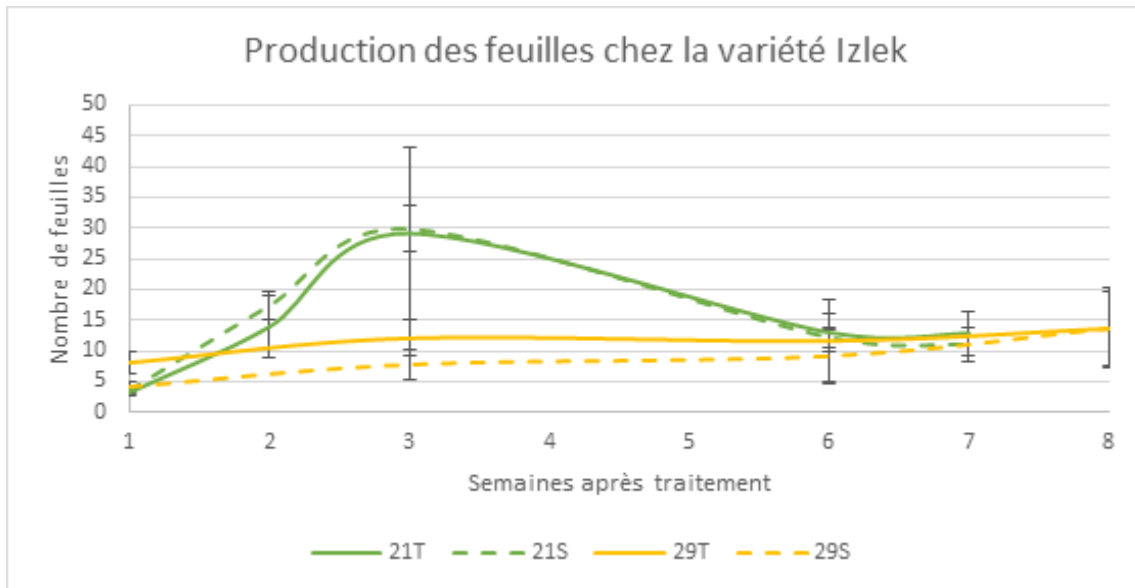


Figure 6 : Impact de la température et du stress hydrique sur la production des feuilles chez *F. tataricum* var. *Izlek*.

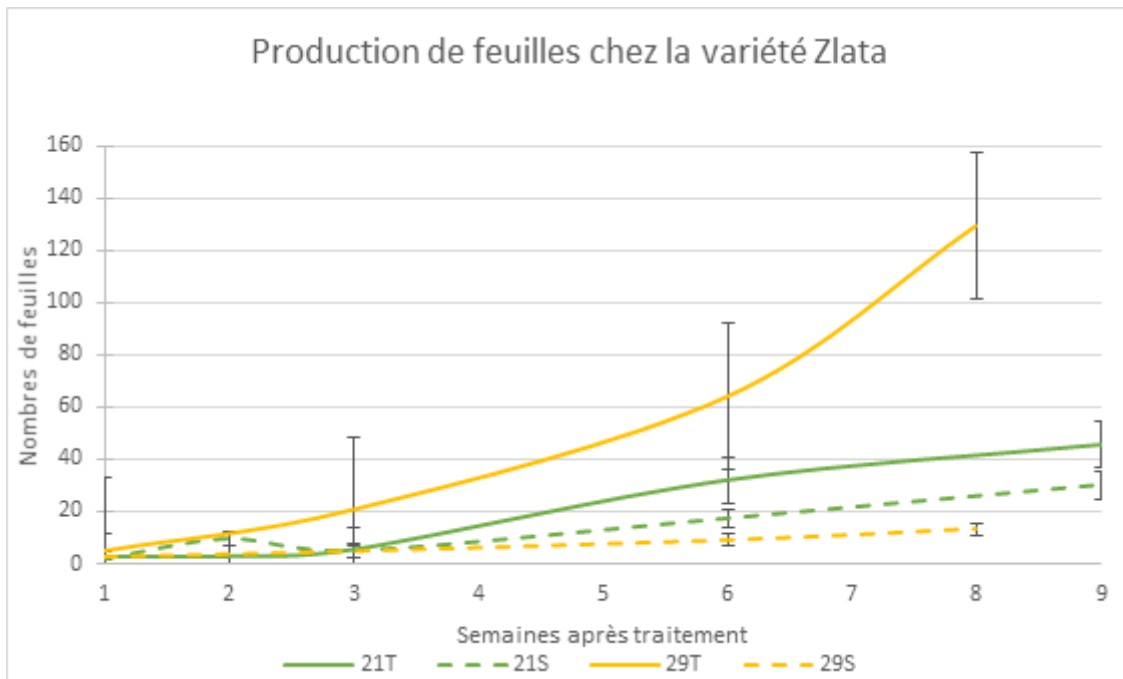


Figure 7 : Impact de la température et du stress hydrique sur la production des feuilles chez *F. tataricum* var. *Zlata*.

Tout comme pour la production de feuilles, la température et le stress hydrique ont eu un impact sur la surface foliaire chez les variétés *Izlek* et *Zlata* tant à 21°C qu'à 29°C (figure 8 et 9). De façon générale, les feuilles de la variété *Zlata* étaient plus grandes que celles d'*Izlek* ($t = -17.87$, $p < 0.0001$, figure 8 et 9). La hausse de température et le stress hydrique ont diminué la surface des feuilles chez les deux variétés. La surface foliaire de la variété *Izlek* était deux fois plus

grande à 21°C qu'à 29°C ($F= 14.27$, $p<0.0001$) et aussi deux fois plus grande chez les plantes témoins que chez les plantes stressées (Figure 8, $t = -9.31$, $p<0.0001$). Chez la variété Zlata, la surface foliaire des plantes soumises à 29°C était inférieure à celles soumises à 21°C, avec un effet assez prononcé de la température ($t= 17.79$, $p<0.0001$) et un l'impact du déficit hydrique qui fut 4 fois plus élevé à 21°C qu'à 29°C (Figure 9, $t=-9.21$, $p<0.0001$).

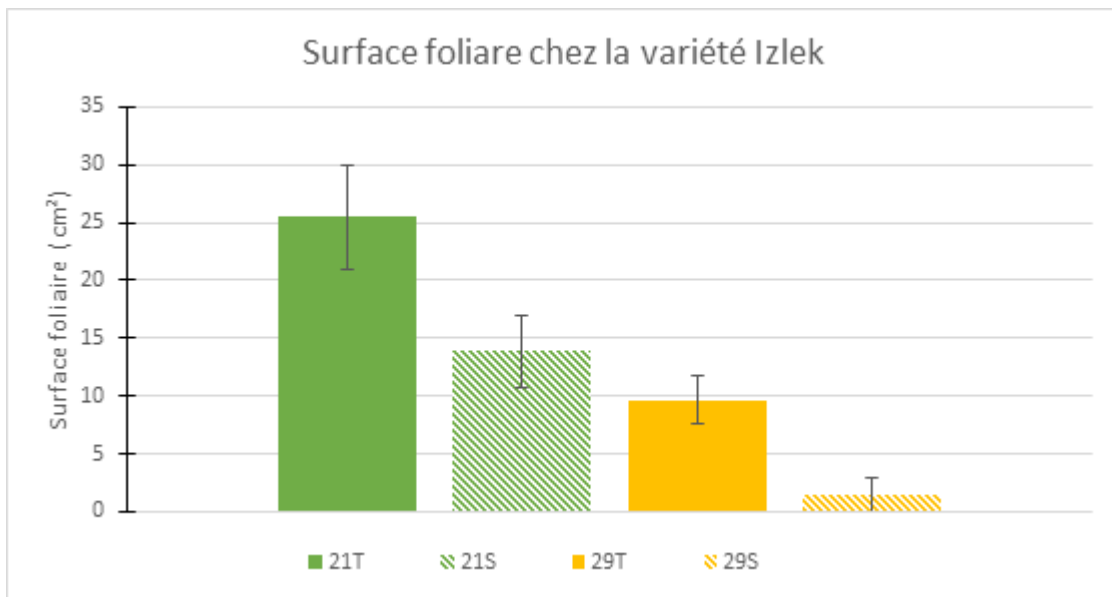


Figure 8 : Impact de la température et du stress hydrique sur la surface foliaire chez *F. tataricum* var. *Izlek*.

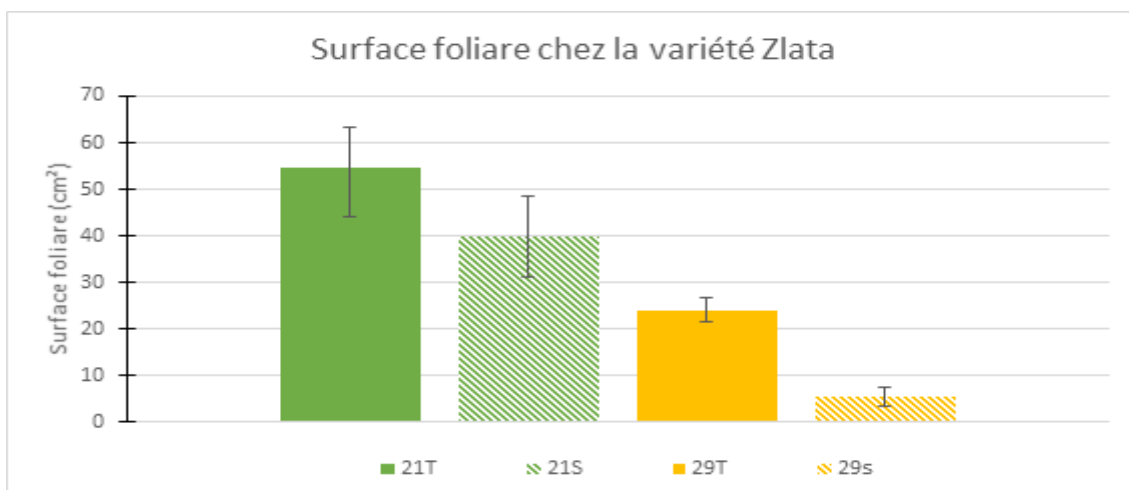


Figure 9 : Impact de la température et du stress hydrique sur la surface foliaire chez *F. tataricum* variété *Zlata*

En plus d'avoir un impact sur la production des feuilles et sur la surface foliaire, le stress hydrique et la température ont eu aussi un effet sur la taille, le nombre de branches et sur la formation des nœuds au sein des 2 variétés. Globalement les plantes de la variété Zlata avaient

une taille plus haute que celle de la variété Izlek ($t = -13.03$, $p < 0.0001$), elle a produit plus de branches ($t = -5.09$, $p < 0.0001$) et formé plus de nœuds ($t = 13.87$, $p < 0.0001$) que la variété Izlek.

Par ailleurs, on a observé que la hausse de température et le stress hydrique ont diminué la taille des plantes chez les 2 variétés (tableau 5 et 6). Le stress hydrique a aussi réduit le nombre de branches chez Izlek surtout à 29°C (tableau 5) et la formation de nœuds chez Zlata (tableau 6).

Tableau 5 : Impact de la température et du stress hydrique sur la taille, le nombre de branches et la formation des nœuds chez *F.tataricum* var. *Izlek*.

Température	Variété Izlek			
	Stress hydrique	Taille	Branches	Nœuds
21°C	Témoins	32,66 ± 7,33	3,5 ± 0,54	8,16 ± 2,04
	Stress	29,35 ± 3,69	3,42 ± 0,53	8,28 ± 1,38
29°C	Témoins	24,21 ± 3,51	4,57 ± 0,78	10,28 ± 1,60
	Stress	14,25 ± 2,39	1,75 ± 1,25	7 ± 3,36
ANOVA 2	Température	F= 35,76 P<0,0001	F=0,86 P=0,354	F=0,2421 P=0,628
	Stress hydrique	F=11,354 P=0,0030	F=20,40 P=0,002	F=3,495 P=0,0763
	Interaction	F=2,85 P=0,1067	F= 18,43 P=0,0004	F=4,04 P=0,058

Tableau 6 : Impact de la température et du stress hydrique sur la taille, le nombre de branches et la formation des nœuds chez *F.tataricum* var. *Zlata*

Température	Variété Zlata			
	Stress hydrique	Taille	Branches	Nœuds
21°C	Témoins	89,6 ± 13,21	4,2 ± 0,83	17,2 ± 1,92
	Stress	44,78 ± 7,48	4,85 ± 0,37	16 ± 1,78
29°C	Témoins	58,2 ± 8,05	5 ± 0,70	19,6 ± 1,67
	Stress	20,16 ± 2,56	4 ± 1	15 ± 2
ANOVA 2	Température	F=43,84 P<0,0001	F=0,0078 P=0,930	F=0,65 P=0,431
	Stress hydrique	F=95,89 P<0,0001	F=0,280 P=0,603	F=11,21 P=0,0044
	Interaction	F=0,6424 P=0,434	F=6,54 P=0,021	F=3,85 P=0,0685

1.1. Poids frais, poids secs et teneurs en eau

Les poids des feuilles ont été moins affectés par la température et le stress hydrique chez Izlek que chez Zlata (tableaux 7 et 8). Chez la variété Izlek, le poids frais des feuilles a diminué avec le stress hydrique mais n'a pas été affecté par la température tandis que le poids sec et la teneur en eau des feuilles étaient similaires quel que soient les conditions (tableau 6). Chez la variété Zlata, un effet significatif de la température a été observé sur les poids frais et sec des feuilles tandis que le stress hydrique a affecté le poids frais, le poids sec et la teneur en eau des feuilles (tableau 6). En effet, chez cette variété, les poids frais et secs des feuilles ont diminué avec le stress hydrique, surtout à 29°C et étaient supérieurs à 29°C qu'à 21°C chez les plantes témoins. La teneur en eau était également plus faible chez les plantes stressées aux deux températures.

Concernant les tiges, chez la variété Izlek, la température et le stress hydrique ont diminué uniquement le poids frais (tableau 7), et l'effet fut tout autre pour la variété Zlata, dont les poids frais et sec furent seulement impactés par le stress hydrique avec une réduction chez les plantes stressées. La teneur en eau des tiges n'a été impactée ni par la température, ni par le stress hydrique quelle que soit la variété.

Tableau 7 : Impact de la température et du stress hydrique, sur le poids frais, le poids sec et la teneur en eau des feuilles et tiges chez *F. tataricum* var. *Izlek*.

Variété izlek							
		Feuilles			Tiges		
Température	Stress hydrique	Poids frais (g)	Poids sec (g)	Teneur en eau %	Poids frais (g)	Poids sec (g)	Teneur en eau %
21°C	Témoins	1,467 ± 0,277	0,140 ± 0,011	90,201 ± 2,144	2,703 ± 0,461	0,244 ± 0,053	90,971 ± 1,289
	Stressées	0,841 ± 0,173	0,117 ± 0,028	85,955 ± 2,979	1,35 ± 0,134	0,151 ± 0,034	88,884 ± 1,408
29° C	Témoins	1,583 ± 0,592	0,298 ± 0,131	81,382 ± 3,688	0,930 ± 0,394	0,120 ± 0,093	87,867 ± 5,832
	Stressées	0,879 ± 0,464	0,145 ± 0,096	82,896 ± 8,219	0,82 ± 0,481	0,099 ± 0,076	88,812 ± 4,273
ANOVA 2	Température	F= 0,1299 P= 0,7243	F= 3,9354 P= 0,0688	F= 3,0929 P= 0,1021	F=20,7181 P=0,0005	F= 4,43 P=0,0533	F=0,4672 P=0,5063
	Stress hydrique	F= 8,99 P= 0,0102	F= 3,5688 P= 0,0814	F=0,1637 P= 0,6924	F=8,36 P=0,0126	F1,89 P=0,1917	F=0,0605 P=0,8095
	Interaction	F= 0,0346 P= 0,8554	F=1,9490 P= 0,1861	F= 0,7224 P= 0,4092	F= 6,03 P=0,0288	F=0,74 P=0,4034	F=0,4259 P=0,5254

Tableau 8 : Impact de la température et du stress hydrique sur le poids frais, le poids sec, et la teneur en eau chez *F. tataricum* var. *Zlata*

Variété Zlata							
Température	Stress hydrique	Feuille			Tige		
		Poids frais (g)	Poids sec (g)	Teneur en eau (%)	Poids frais (g)	Poids sec (g)	Teneur en eau (%)
21° C	Témoins	5,128 ± 0,303	0,699 ± 0,077	86,314 ± 1,835	10,572 ± 0,735	1,043 ± 0,105	90,141 ± 0,501
	Stressées	3,749 ± 0,505	0,5858 ± 0,074	84,334 ± 1,168	5,346 ± 0,283	0,495 ± 0,109	90,755 ± 1,874
29° C	Témoins	11,787 ± 1,031	1,608 ± 0,033	86,288 ± 1,481	14,515 ± 1,678	1,752 ± 0,134	87,791 ± 2,332
	Stressées	3,573 ± 2,860	0,593 ± 0,436	82,314 ± 2,606	4,670 ± 4,039	0,594 ± 0,520	88,221 ± 2,527
ANOVA 2	Température	T = -2,98	T = -2,78	T = 156	F = 1,25	F = 4,57	F = 5,1242
		P = 0,0115	P = 0,0168	P = 0,144	P = 0,2807	P = 0,0495	P = 0,0389
	Stress hydrique	T = -5,10	T = -3,91	T = -3,55	F = 26,64	F = 20,35	F = 0,233
		P = 0,0003	P = 0,021	P = 0,004	P = 0,0001	P = 0,0004	P = 0,635
	Interaction	T = 3,71	T = 3,17	T = 1,54	F = 2,50	F = 2,60	F = 0,0073
		P = 0,003	P = 0,0081	P = 0,1503	F = 0,1346	P = 0,127	P = 0,932

2. Mesures physiologiques

Les mesures physiologiques ayant trait au statut hydrique (Tableau 9 et 10 ; conductance stomatique (GS) et taux de transpiration nette (E)) et aux paramètres photosynthétiques (Tableau 11 et 12 ; teneur en chlorophylle (ICC), taux de photosynthèse nette (A) et concentration intercellulaire en C(Ci)) ont été prises entre les 4^{ème} et 8^{ème} semaines de l'expérience.

Tableau 9 : Impact de la température et du stress hydrique sur la conductance stomatique (GS) et le taux de transpiration (E) chez *F. tataricum* var. *Izlek* et *Zlata* à la 4^{ème} semaine après début du traitement.

Température	Stress hydrique	Variété Izlek		Variété Zlata	
		E (mmole H ₂ O m ² /s)	Gs (mole H ₂ O m ² /s)	E (mmole H ₂ O m ² /s)	Gs (mole H ₂ O m ² /s)
21°C	Témoins	6,93 ± 1,03	0,04 ± 0,01	0,60 ± 0,42	0,03 ± 0,02
	Stressées	2,38 ± 1,53	0,072 ± 0,03	0,39 ± 0,23	0,02 ± 0,01
29°C	Témoins	7,64 ± 0,64	0,42 ± 0,07	1,48 ± 0,55	0,52 ± 0,21
	Stressées	3,67 ± 0,02	0,18 ± 0,15	1,08 ± 0,72	0,04 ± 0,03
ANOVA 2	Température	F = 1,62	F = 57,72	F = 21,08	F = 61,47
		P = 0,209	P < 0,0001	P < 0,001	P < 0,001
	Stress hydrique	F = 29,09	F = 9,81	F = 3,21	F = 57,82
		P < 0,0001	P = 0,0032	F = 0,0818	P < 0,001
	Interaction	F = 0,136	F = 16,02	F = 0,273	F = 52,87
		P = 0,713	P = 0,0003	P = 0,604	P < 0,001

Les mesures prises à la 4^{ème} semaine après le traitement montraient chez les 2 variétés qu'une hausse de température augmentait la conductance stomatique tandis que le stress hydrique la diminuait (Tableau 9. En ce qui concerne le taux de transpiration, il était plus élevé chez Izlek que chez Zlata ($t= 10.05$, $F<0.0001$) et l'impact de la température et du stress hydrique différait entre variétés. Chez Izlek, le taux de transpiration diminuait avec le stress hydrique quelle que soit la température tandis que chez Zlata, le taux de transpiration augmentait avec la température mais était peu affecté par le stress hydrique.

Globalement les différences entre conditions étaient moins marquées en 8^{ème} semaines après le début du traitement (Tableau 10). Contrairement à la 4^{ème} semaine il a été observé que la conductance stomatique était plus élevée à 21°C qu'à 29°C chez Izlek tandis que le stress hydrique continuait à diminuer la conductance stomatique chez les deux variétés. Cependant, les effets sur le taux de transpiration n'étaient plus significatifs.

Tableau 10 : Impact de la température et du stress hydrique sur la conductance stomatique (GS) et le taux de transpiration (E) chez *F.tataricum* var. Izlek et Zlata à la 8^{ème} semaine après début du traitement.

Température	Stress hydrique	Variété Izlek		Variété Zlata	
		E (mmole H ₂ O m ² /s)	Gs (mole H ₂ O m ² /s)	E (mmole H ₂ O m ² /s)	Gs (mole H ₂ O m ² /s)
21°C	Témoins	2,26 ± 0,72	0,23 ± 0,1	1,53 ± 0,46	0,098 ± 0,03
	Stressées	2,38 ± 0,41	0,072 ± 0,06	0,39 ± 0,17	0,02 ± 0,01
29°C	Témoins	1,26 ± 0,84	0,18 ± 0,05	2,28 ± 1,60	0,07 ± 0,05
	Stressées	2,49 ± 1,51	0,05 ± 0,02	3,03 ± 2,35	0,03 ± 0,005
ANOVA 2	Température	F= 0,238	F=8,68	F=2,65	F=0,64
		P= 0,62	P=0,0064	P=0,114	P=0,43
	Stress hydrique	F=0,74	F=22,13	F=0,0002	F=7,003
		P=0,39	P<0,0001	P=0,99	P= 0,013
	Interaction	F=1,42	F =0,482	F=0,72	F=0,18
		P=0,24	P=0,493	P=0,40	P=0,67

La 4^{ème} semaine après le début du traitement (tableau 11) on observe un effet significatif de la température sur la teneur en chlorophylle, le taux de photosynthèse net et la concentration intercellulaire en CO₂ chez les plantes de la variété Izlek, et uniquement sur le taux de photosynthèse nette chez les plantes de la variété Zlata. Dans tous les cas, les valeurs de ces paramètres augmentaient avec la température. Le stress hydrique a influencé les 3 paramètres

photosynthétiques chez la variété Zlata mais uniquement la teneur en chlorophylle chez la variété Izlek. La teneur en chlorophylle était plus élevée chez les plantes stressées chez les deux variétés tandis que le stress hydrique a diminué le taux de photosynthèse net et la concentration intercellulaire en CO₂ chez Zlata.

Tableau 11 : Effet de la température et du stress hydrique sur la teneur en chlorophylle (SPAD), le taux de photosynthèse nette (A) et la concentration intracellulaire (ci) chez *F.tataricum* var. *Izlek* et *Zlata* à la 4^{ième} semaine.

Température	Stress hydrique	Variété Izlek			Variété Zlata		
		ICC SPAD	A µmole CO2 m2/sec.)	Ci µmole CO2 mole-1	ICC SPAD	A µmole CO2 m2/sec.)	Ci µmole CO2 mole-1
21°C	Témoins	8,375 ± 0,525	0,967 ± 0,88	303,482 ± 19,86	8,16 ± 1,35	1,24 ± 0,8	346,47 ± 17
	Stressées	10,94 ± 0,462	1,115 ± 0,90	332,27 ± 32,34	24,25 ± 2,30	0,99 ± 0,7	323,57 ± 14,45
29°C	Témoins	13,84 ± 3,60	2,71 ± 1,40	385,467 ± 11,24	11,03 ± 2,913	2,94 ± 0,560	392,15 ± 3,985
	Stressées	21,37 ± 3,22	2,66 ± 1,28	402,274 ± 56,92	18,13 ± 5,36	1,80 ± 1,205	317,25 ± 69,128
ANOVA 2	Température	F= 29,61 P= 0,0001	F= 19,72 P<0,0001	F= 36,01 P<0,0001	F=0,812 P= 0,385	F=16,35 P=0,0003	F=2,295 P=0,138
	Stress hydrique	F=11,944 P=0,0043	F=0,0178 P=0,894	F=3,24 P=0,08	F=41,609 P<0,0001	F=4,396 P= 0,0433	F=14,17 P=0,0006
	Interaction	F= 2,884 P= 0,1132	F= 0,714 P=0,7906	F=0,223 P=0,63	F= 6,266 P= 0,0277	F=1,734 P=0,196	F=4,007 P=0,053

Tableau 12 : Effet de la température et le stress hydrique sur la teneur en chlorophylle (SPAD), le taux de photosynthèse net (A) et la concentration intracellulaire (ci) chez *F.tataricum* var. *Izlek* et *Zlata* à la 8^{ième} semaine.

Température	Stress hydrique	Variété Izlek			Variété Zlata		
		ICC SPAD	A µmole CO2 m2/sec.)	Ci µmole CO2 mole-1	ICC SPAD	A µmole CO2 m2/sec.)	Ci µmole CO2 mole-1
21°C	Témoins	6,26 ± 0,477	1,731 ± 0,490	412,593 ± 2,21	6,66 ± 0,74	1,81 ± 0,11	398,64 ± 16,24
	Stressées	10,91 ± 0,68	3,385 ± 1,641	388,22 ± 21,42	10,27 ± 1,57	1,565 ± 0,22	361,475 ± 29,22
29°C	Témoins	11,61 ± 0,71	2,105 ± 0,93	388,116 ± 11,90	9,21 ± 2,02	2,012 ± 1,25	340,184 ± 46,08
	Stressées	25,815 ± 4,38	1,466 ± 0,163	382,010 ± 94,98	17,006 ± 3,82	0,62 ± 0,124	377,887 ± 61,08
ANOVA 2	Température	F=42,74 P<0,0001	F= 1,294 P=0,264	F=0,208 P=0,651	F=10,875 P=0,0071	F= 0,401 P=0,531	F=0,706 P=0,407
	Stress hydrique	F=32,61 P=0,0002	F=0,5579 P=0,4613	F= 0,205 P=0,654	F=16,425 P=0,0019	F=1,949 P=0,1729	F=0,0001 P=0,991
	Interaction	F=10,154 P=0,0097	P=2,852 P=0,102	F= 0,073 P=0,788	F=2,2072 P=0,1655	F=0,958 F=0,335	F=2,2389 F=0,145

A la 8^{ième} semaine, en fin de culture, les seules différences observées concernaient la teneur en chlorophylle des feuilles. Les feuilles de la variété Izlek présentaient une teneur en chlorophylle plus élevée que celles de Zlata (t=2.55, p=0.0186). De plus, la teneur en chlorophylle

augmentait avec la température et le stress hydrique chez Izlek et Zlata (tableau 12).

3. Phase reproductive

3.1. Production d'inflorescences en anthèse

Le rythme d'apparition des inflorescences était fort différent entre les 2 variétés du sarrasin de Tartarie (figure 10 et 11). L'apparition d'inflorescences a commencé plus tôt chez la variété Izlek que chez la variété Zlata mais au final Zlata a produit plus d'inflorescences qu'Izlek aussi bien à 21°C qu'à 29°C.

La production d'inflorescence chez Islek a été impactée par le stress hydrique ($F=40.81$, $p<0.0001$) et la température ($F=14.56$, $p=0.00021$) dès la 1^{ère} semaine de traitement. A 21°C le pic de production d'inflorescences est atteint à la 3^{ième} semaine et seul un effet de la température est observé à cette date ($F=17.24$, $p=0.0004$). Par la suite, on a observé progressivement une baisse du nombre d'inflorescences en anthèse chez les plantes à 21°C suite à la fructification des fleurs. Le nombre d'inflorescences était assez similaire chez les plantes témoins et stressées à 21°C. En revanche, à 29°C le stress hydrique a diminué le nombre d'inflorescences tout au long de la culture (S3 : $F=5.14$, $p=0.044$, S8 : $F=10.73$, $p=0.007$). Bien que plus faible qu'à 21°C, la production d'inflorescence a continué à augmenter tout au long de l'expérience à 29°C avec une première phase de croissance de la 1^{ère} à la 3^{ième} semaine, suivie d'une phase de latence et ensuite d'une reprise de la 6^{ième} à la 8^{ième} semaine.

Contrairement à la variété Izlek, la production d'inflorescences chez la variété Zlata a été progressive jusqu'en fin d'expérience et les différences entre températures et traitements hydriques ont augmenté avec le temps. A 21°C, l'effet du stress hydrique s'est seulement fait ressentir à la 6^{ième} semaine ($F=15.87$, $p=0.022$) tandis qu'à 29°C il s'est fait ressentir dès la 3^{ième} semaine (S3 : $F=6.30$, $p=0.036$; S6 : $F=29.66$, $p=0.0004$, S8 : $t=-10.64$ $p<0.0001$). Au final, les plantes ayant produit le plus d'inflorescences étaient les plantes témoins à 29°C.

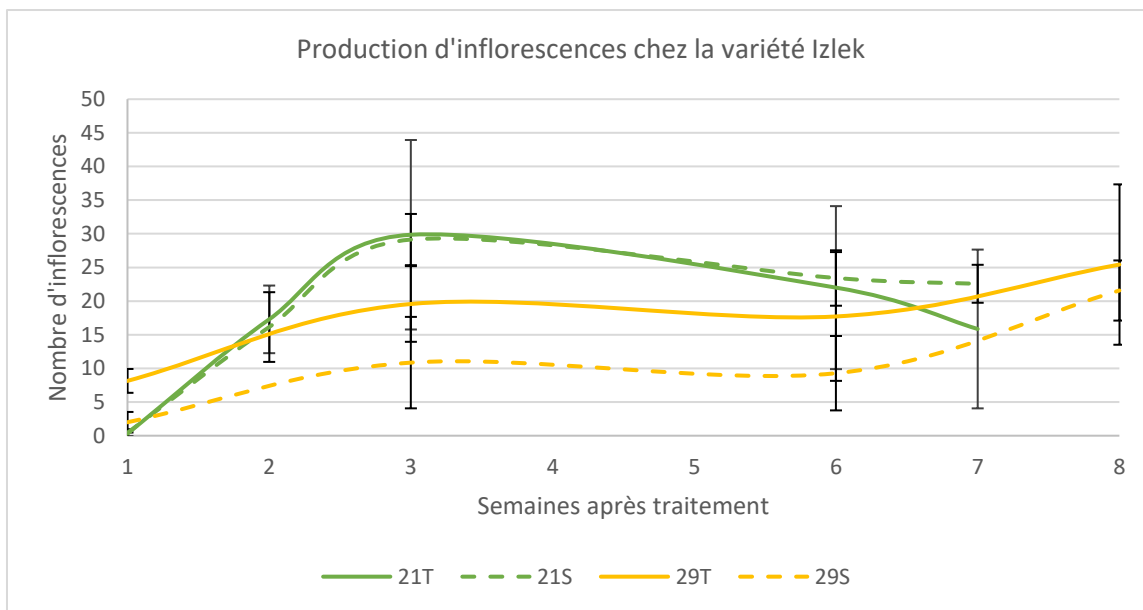


Figure 10 : Impact de la température et du stress hydrique sur la production d'inflorescences chez *F.tataricum* var. *Izlek*

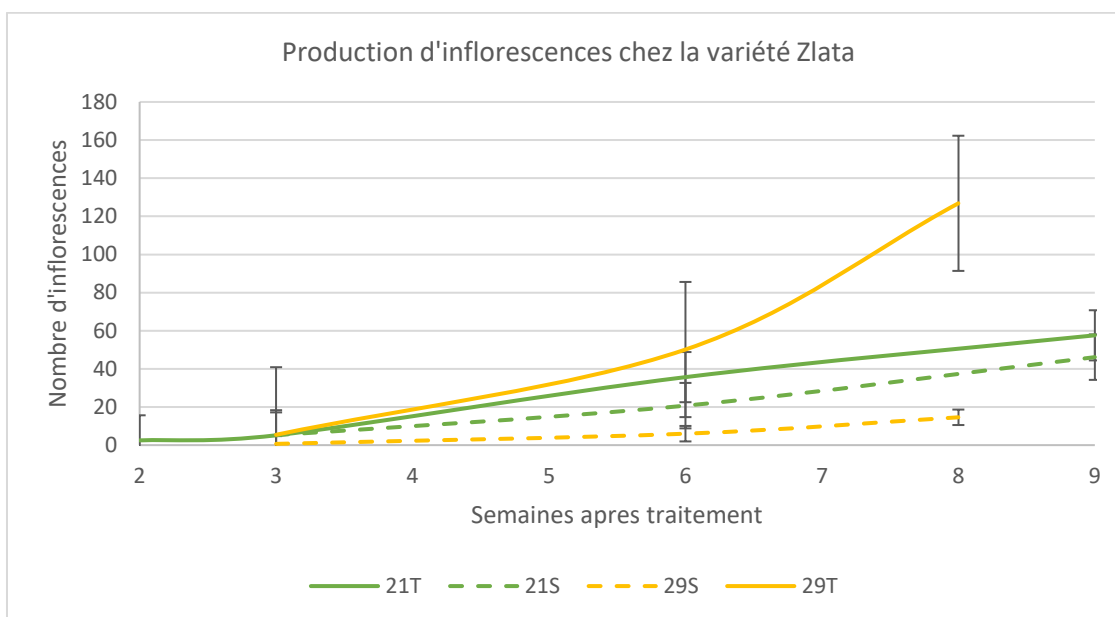


Figure 11 : Impact de la température et du stress hydrique sur la production d'inflorescences chez *F.tataricum* var. *Zlata*

Les poids frais et sec et la teneur en eau des inflorescences ont été mesurées chez les deux variétés. Au sein des 2 variétés, on a observé aucun effet significatif de la température et du stress hydrique sur ces paramètres pour les inflorescences (tableau 13 et 14).

Tableau 13 : Impact de la température et du stress hydrique sur les poids frais et sec, et la teneur en eau des inflorescences par plante chez *F.tataricum* var. *Izlek*.

Variété Izlek				
Inflorescences				
Température	Stress hydrique	Poids frais (g)	Poids sec (g)	Teneur en eau
21°C	Témoins	0,063 ± 0,027	0,0219 ± 0,015	66,073 ± 12,836
	Stressées	0,063 ± 0,018	0,018 ± 0,009	72,245 ± 7,084
29°C	Témoins	0,112 ± 1,045	0,064 ± 0,021	43,650 ± 7,525
	Stressées	0,488 ± 1,045	0,041 ± 0,032	73,516 ± 20,154
ANOVA 2	Température	F= 0,2734	F=4,72	F= 1,246
		P=0,61	P= 0,05	P=0,28
	Stress hydrique	F=0,172	F=0,073	F= 3,61
		F= 0,68	P=0,40	P= 0,08
	Interaction	F=0,171	F=0,3785	F=1,56
		P=0,686	P=0,54	P=0,234

Tableau 14 : Impact de température et du stress hydrique sur les poids frais et sec, et la teneur en eau des inflorescences par plante chez *F.tataricum* var. *Zlata*.

Variété Zlata				
Inflorescences				
Température	Stress hydrique	Poids frais (g)	Poids sec (g)	Teneur en eau
21°C	Témoins	0,603 ± 0,885	0,051 ± 0,010	63,888 ± 28,995
	Stressées	0,115 ± 0,082	0,049 ± 0,028	44,234 ± 29,157
29°C	Témoins	1,124 ± 0,031	0,277 ± 0,040	75,351 ± 2,904
	Stressées	0,543 ± 0,569	0,182 ± 0,204	69,898 ± 6,766
ANOVA 2	Température	F= 2,1065	F=4,576	F= 2,86
		P=0,1173	P=0,058	P=0,121
	Stress hydrique	F=2,676	F=0,3341	F=1,3081
		P=0,1329	F=0,570	P=0,2794
	Interaction	F=0,0205	F=0,312	P=0,418
		P=0,889	P=0,588	P= 0,532

3.2. Production de graines

Dans notre expérience, les graines ont majoritairement été formées à 21°C chez les 2 variétés, et donc très peu de graines ont été formées à 29°C. Dans l'ensemble, la variété Zlata a produit plus de graines aux 2 températures que la variété Izlek.

Les premières graines sont apparues chez la variété Izlek dès la 2^{ième} semaine après le début du traitement (figure 12) mais seul l'effet de la température s'est fait ressentir à la 3^{ième} semaine ($F= 43,41$, $p<0.0001$) et 6^{ième} semaine ($t=8.61$, $p<0.0001$) avec une production plus importante à 21°C qu'à 29°C. Le stress hydrique n'a pas affecté la production de graines chez cette variété. De la 3^{ième} à la dernière semaine on a observé une phase latente dans la production de graines aux deux températures. Chez la variété Zlata, on a observé une augmentation de la production des graines avec le temps et même chez les témoins soumis à 29°C. Dès la 3^{ième} semaine, l'effet de la température ($t= 5.06$, $p= 0.0001$) et du stress hydrique ($t= -3.39$, $p= 0.004$) sur la formation des graines étaient significatifs. La production de graines était plus importante à 21°C qu'à 29°C et chez les plantes témoins que chez les plantes en stress hydrique. En dernière semaine à 29°C l'effet du stress hydrique ($F= 12.73$, $p= 0.0051$) devient assez significatif car très peu de graines sont formées chez les plantes stressées.

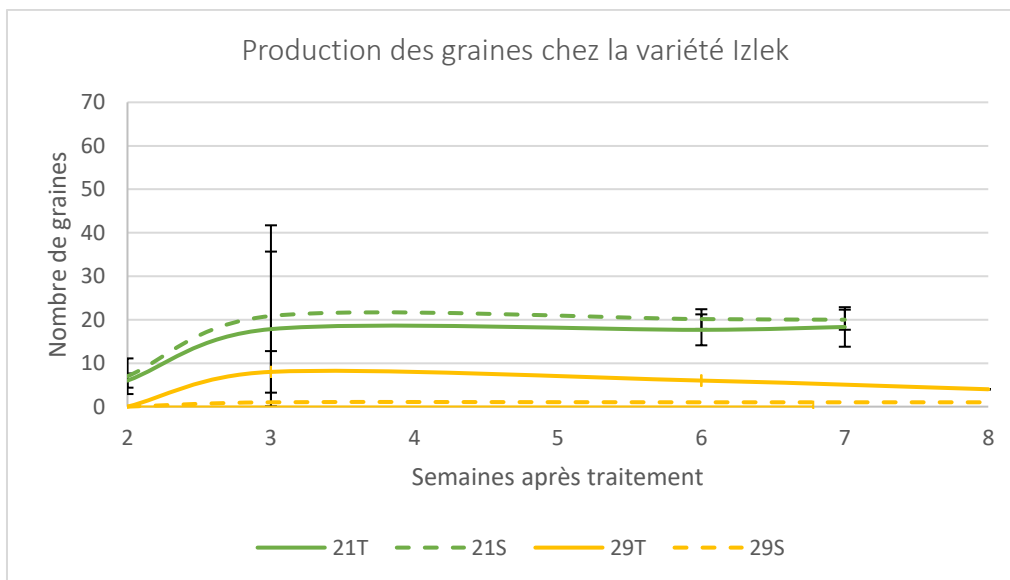


Figure 12 : Impact de la température et du stress hydrique sur la production de graines chez *F.tataricum* var. Izlek.

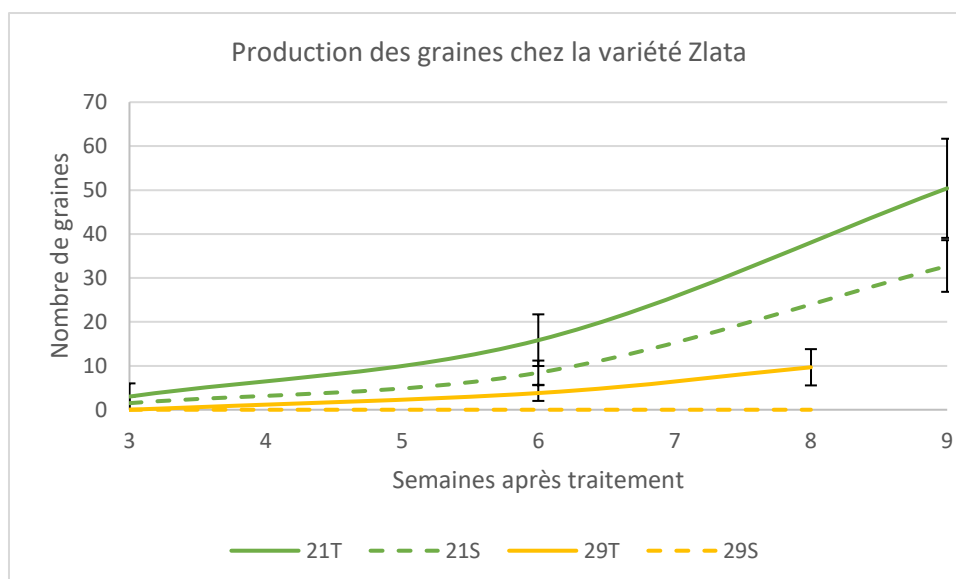


Figure 13 : Impact de la température et du stress sur la production de graines chez *F.tataricum* var. *Zlata*.

En fin d'expérience, nous avons recueilli des graines vertes et brunes, mais seules les graines brunes ont été prises en compte pour la mesure des poids des graines par plante. La température et le stress hydrique n'ont pas eu d'effet sur le poids frais, sec et la teneur en eau des graines brunes par plante chez la variété *Izlek*, contrairement à la variété *Zlata* où l'effet de la température et du stress hydrique fut observé sur le poids frais et sec des graines brunes par plante (tableau 16). Ceux-ci étaient plus faibles chez les plantes cultivées à 29°C et soumises à un stress hydrique.

Tableau 15 : Impact de la température et du stress hydrique sur les poids frais et sec, et la teneur en eau des graines brunes par plante chez *F.tataricum* var. *Izlek*

Variété <i>Izlek</i>				
Graines brunes				
Température	Stress hydrique	Poids frais (g)	Poids sec (g)	Teneur en eau
21°C	Contrôle	0,632 ± 0,4	0,508 ± 0,353	20,858 ± 4,480
	Stressées	0,756 ± 0,1	0,636 ± 0,107	15,813 ± 0,580
29°C	Contrôle	0	0	0
	Stressées	0,9	0,78	14,545
Température		T=-0,37 P= 0,734	T=-0,40 P=0,72	T=0,28 P=0,796
Stress hydrique		T=0,39 P=0,72	T=0,48 P=0,66	T=-1,50 P=0,22

Tableau 16 : Impact de la température et du stress hydrique sur les poids frais et sec, et la teneur en eau des graines brunes par plante chez *F.tataricum* var.Zlata.

Variété Zlata				
Graines brunes				
Température	Stress hydrique	Poids frais (g)	Poids sec (g)	Teneur en eau
21° C	Contrôle	1,426 ± 0,236	1,19785 ± 0,186	15,960 ± 0,863
	Stressées	0,714 ± 0,059	0,587 ± 0,042	17,698 ± 1,762
29°C	Contrôle	0,054 ± 0,033	0,013 ± 0,008	58,764 ± 41,714
	Stressées	0,0219 ± 0,007	0,012 ± 0,013	52,287 ± 42,519
ANOVA 2	Température	T=15,39	T=17,54	T=-2,02
		P<0,0001	P<0,0001	P= 0,090
	Stress hydrique	T=-5,35	T=17,05	T=0,12
		P=0,0014	P<0,0001	P=0,905
	Interaction	T=-5,07	T= 0,21	T= 0,21
		P=0,0023	P=0,837	P= 0,837

4. Teneur en minéraux des graines

Les teneurs en minéraux (Cu, Fe, K, Mg, Zn) ont été dosées dans les graines des plantes cultivées à 21°C mais n'ont pu être dosées dans les graines des plantes cultivées à 29°C suite à des quantités de graines trop faibles. Globalement, les teneurs en minéraux dans les graines étaient similaires entre les deux variétés sauf pour la teneur en K qui était plus importante dans les graines d'Izlek ($t= 3.80$, $p= 0.0029$, tableau 17). Le stress hydrique n'a pas modifié les teneurs en Fe, Mg et Zn des graines (tableau 17) et a diminué les teneurs en Cu dans les graines chez les deux variétés. Concernant la teneur en K, l'effet du stress hydrique était différent selon la variété, et les graines stressées contenaient plus de K que les graines témoins chez Zlata ($F= 8,407$, $P=0,033$).

Tableau 17 : Impact du stress hydrique sur la teneur en minéraux des graines de sarrasin de *F.tataricum* obtenues en serre à 21°C.

Variété	Traitement	Cu $\mu\text{g/g}$	Fe mg/g	K mg/g	Mg mg/g	Zn mg/g
Izlek	21T	4,071 \pm 1,07	0,0367 \pm 0,02	11,013 \pm 1,12	1,812 \pm 0,38	0,06 \pm 0,01
	21S	2,64 \pm 2,07	0,042 \pm 0,009	8,161 \pm 2,88	1,49 \pm 0,32	0,044 \pm 0,016
Zlata	21T	3,501 \pm 2,63	2,525 \pm 0,5	5,029 \pm 1,19	1,43 \pm 0,256	0,04 \pm 0,009
	21S	0,903 \pm 0,5	0,0076 \pm 0,001	7,217 \pm 0,54	1,684 \pm 0,161	0,044 \pm 0,01
ANOVA 2	Variétés	F= 1,326	F=1,298	F=14,46	F=0,362	F=1,17
		P=0,273	P=0,278	P=0,0029	P=0,59	P=0,30
	Stress hydrique	F=7,334	F=1,363	F=0,132	F= 0,043	F=1,40
		P=0,02	P=0,266	P=0,72	P=0,83	P=0,26
Interaction	F=0,322	F= 1,35	F=7,65	F=3,16	F=1,033	

IV. Discussion

1) Qualité nutritionnelle des graines de sarrasin commun et de Tartarie

Les graines de sarrasin sont connues pour posséder des qualités nutritionnelles exceptionnelles ; ses teneurs en minéraux, protéines, acides aminés font de cette pseudo céréale un aliment de choix parmi tant d'autres (Gulpinar et al., 2012; Maki et al., 2018, 2018; Y. Zhou et al., 2019) C'est également un aliment intéressant surtout pour le développement de nouveau aliment fonctionnel (Kato et al., 2000; Z.-L. Zhang et al., 2012). Dans cette étude, nous avons comparé la qualité nutritive des deux variétés de sarrasin commun et de deux variétés de sarrasin de Tartarie cultivées en champ à Marbais.

Concernant les teneurs en minéraux, nos résultats montraient que le sarrasin contient du cuivre, du fer, du zinc mais que ses teneurs en magnésium et potassium étaient largement au-dessus des autres minéraux. Ces résultats confirment les analyses de (Farooq et al., 2016; F. Khan et al., 2013; Sytar et al., 2018)) concernant les teneurs en potassium, magnésium et calcium ; ils affirmaient également que le sarrasin est riche en phosphore et sodium, mais ces deux autres minéraux n'ont pas été dosé dans notre étude. Cependant, les concentrations observées dans nos résultats pour le fer, le cuivre et le zinc sont inférieures à celles observées dans l'étude de Lim, (2013) chez le sarrasin commun et chez le blé par (Wang et al., 2020) alors que le sarrasin est généralement décrit comme étant riche en fer et en cuivre par rapport à d'autres espèces (Ikanovic et al., 2013; Lim, 2013; Rodríguez et al., 2020; Steadman et al., 2001; M. Zhou et al., 2018). Dans notre étude, les 2 espèces de sarrasin ont montré des teneurs en minéraux assez similaires sauf pour la teneur en magnésium qui était plus élevée chez le sarrasin commun. Cette observation contraste avec les résultats de Bonafaccia et al. (2003) et Pongrac et al. (2013) qui ont observé que les graines entières de sarrasin de Tartarie contenaient des niveaux de minéraux plus élevés que le sarrasin commun. Cette différence vient peut-être du fait que l'analyse a été faite dans d'autres variétés que les nôtres et nous avons en effet observé que les teneurs en minéraux pouvaient varier selon la variété pour une même espèce. Dans nos conditions, des deux variétés du sarrasin commun, les graines de La harpe étaient plus riches en potassium mais plus pauvre en cuivre que les graines de Darja tandis que pour les variétés du sarrasin de Tartarie, les teneurs en zinc étaient plus élevés chez la variété Zlata que chez la variété Izlek. Si Bonafaccia et al. (2003) ont analysé la variété Izlek pour le sarrasin de Tartarie, leur étude a porté sur la variété Siva pour le sarrasin commun, ce qui peut expliquer les différences observées. (Martínez-Villaluenga et al., 2020; Pongrac et al., 2013; Steadman et al.,

2001) affirment que la plupart des composés minéraux présents dans les grains des pseudo-céréales se trouvent dans le son, particulièrement le potassium, le phosphore et le magnésium, en particulier dans le son dont la coque a été enlevée avant de broyer les grains. Dans notre étude, les teneurs en minéraux ont été mesurées dans l'ensemble de la graine, son compris. Nous ne pouvons donc pas faire de différences entre les différentes parties de la graine. Concernant la comparaison avec d'autres espèces, le sarrasin serait une meilleure source de magnésium, potassium, phosphore, zinc, manganèse et cuivre que les autres céréales avec des teneurs en potassium et magnésium largement supérieures (Sytar et al., 2018). Par ailleurs, Ikeda et al. (2006) ont comparé les teneurs en Fe, Zn, Cu, Mn, Mg, K et P de farine de sarrasin aux farines de céréales en utilisant une technique de digestion enzymatique in vitro et ils ont montré une teneur plus élevée en minéraux essentiels dans la farine de sarrasin par rapport aux farines de riz, le blé et le maïs. Parmi les pseudo-céréales connues, l'amarante contiendrait cependant la plus grande quantité de minéraux, suivie du quinoa et du sarrasin (B. Joshi, 2014; Martínez-Villaluenga et al., 2020; Q. Zhang & Xu, 2017). Le sarrasin est donc une source plus riche en minéraux nutritifs que de nombreuses céréales courantes, à l'exception du calcium mais a des teneurs en minéraux inférieures aux autres pseudo-céréales. Dans la littérature, il est indiqué que la teneur en potassium du sarrasin est presque sept fois supérieure à celle du sodium indiquant une bonne source pour les patients souffrant d'hypertension (Sytar et al., 2018). Nous ne pouvons cependant confirmer cette hypothèse car les teneurs en sodium n'ont pas été quantifiées dans ce travail.

Comme dans toutes les plantes existantes, le profil et la teneur en protéines dépendent du génotype et des conditions de croissance (Martínez-Villaluenga et al., 2020). Les résultats de nos analyses sur les protéines montrent que les graines entières de sarrasin commun sont plus riches en protéines que celles du sarrasin de Tartarie avec des teneurs assez similaires entre variétés au sein d'une même espèce. Ces résultats confirment l'analyse de (Bonafaccia et al., 2003). Dans la littérature la teneur en protéines du sarrasin est d'environ 12% (Q. Zhang & Xu, 2017) ce qui est en accord avec nos résultats (12% pour le sarrasin de Tartarie contre 15% pour le sarrasin commun). Par ailleurs, les protéines du sarrasin semblent particulièrement intéressantes étant donné que tant celles du sarrasin commun que du sarrasin de Tartarie possèdent de nombreuses fonctions physiologiques uniques sur la santé humaine (Zhang et al., 2012). Par exemple, les protéines du sarrasin de Tartarie ont une activité réductrice du cholestérol (X.-L. Zhou et al., Sep 2018c). (J. Kayashita et al., 1997) ont en effet montré que

des rats nourris avec du sarrasin de Tartarie avaient des concentrations significativement plus faibles de cholestérol plasmatique et une excrétion accrue de stérols neutres totaux et d'azote dans les fèces que les rats nourris avec de la caséine. En général, les protéines du sarrasin de Tartarie ont un effet de réduction du cholestérol plus efficace que les protéines du soja (Zhou et al., 2018). D'après Zhou et al. (2018c), une consommation accrue de protéines de sarrasin de Tartarie à long terme a un effet préventif sur la dyslipidémie, qui est une cause majeure de maladies cardiovasculaires. Comparés aux céréales, les pseudo-céréales ont une valeur nutritionnelle supérieure, ce qui est en partie lié à leurs niveaux de protéines plus élevés et qui varient de 9 à 16,8% pour le quinoa, 13,1 à 21,5% pour l'amarante et 5,7 à 14,2% pour le sarrasin (D. C. Joshi et al., 2019; Shukla et al., 2018) et qui fait d'eux des contributeurs clés à l'apport en protéines humaines. Au vu de nos résultats, nous pouvons affirmer avec (K. Khan & Shrewry, 2009; Pantoa et al., 2020; L. Zhang et al., 2020) que la teneur en protéines du sarrasin est particulièrement élevée par rapport à d'autres céréales telles que le riz (7.2-11.5%) le maïs (8.6-11.1%), le blé (10-12%) et le sorgho (11.3%). Dans leur étude, Biel & Maciorowski (2013) ont évalué la composition chimique des produits de sarrasin (coque, son et gruau) et la plus grande teneur en protéines a été trouvée dans le son. Ayant réalisé nos analyses sur les graines entières nous ne pouvons affirmer ou infirmer cette observation. Par ailleurs, contrairement à la plupart des céréales courantes (orge, seigle, blé maïs), les protéines du sarrasin se composent principalement de globulines et d'albumines, et contiennent très peu ou pas de protéines de prolamine de stockage, qui sont les principales protéines responsables de la maladie cœliaque (Saulnier, 2012; Sytar et al., 2018).

La composition en acides aminés des protéines de sarrasin est bien équilibrée et d'une grande valeur biologique (Kato et al., 2000; Sytar et al., 2018; Z.-L. Zhang et al., 2012). Nos résultats montrent que les teneurs en acides aminés essentiels et non essentiels étaient quasiment identiques chez le sarrasin commun et de Tartarie mais avec une teneur plus élevée en proline chez le sarrasin de Tartarie. L'étude de (Bonafaccia et al., January 31, 2003a) a aussi montré des teneurs en acides aminés similaires entre les deux espèces de sarrasin. Notre comparaison entre variétés montre que chez le sarrasin commun, la teneur en proline était plus importante chez la variété Darja que chez la variété La Harpe tandis que chez le sarrasin de Tartarie, la variété Zlata avait des teneurs plus élevées en glutamine, arginine, et méthionine que la variété Izlek. L'analyse faite par (Sytar et al., 2018) montrait que les graines de sarrasin avaient un profil d'acides aminés équilibré avec une teneur élevée en isoleucine, lysine, histidine, tryptophane, valine, et phénylalanine, cependant, nos résultats ont plutôt montré une teneur

élevée en asparagine, glutamate, sérine, thréonine, arginine, alanine et leucine. En général, les pseudo-céréales ont un équilibre exceptionnel en acides aminés, avec une teneur plus élevée en lysine, méthionine, tryptophane et cystéine que les céréales communes qui sont principalement déficientes en lysine et secondairement déficientes en thréonine et tryptophane (Motta et al., 2019). Le sarrasin est particulièrement connu pour sa haute teneur en lysine mais bien que la teneur en lysine que nous avons observée (2,5 mg /100g de protéines) est supérieure à celle du blé (0.33mg /100g de protéines ; (Saulnier, 2012), elle est inférieure à celle observée dans d'autres études chez le sarrasin (6-7.5 mg/100mg, Bhinder et al., 2020; Bonafaccia et al., January 31, 2003a), Wioletta Biel & Maciorowski, 2013; Shukla et al., 2018). La différence observée dans nos résultats pourrait s'expliquer par plusieurs raisons notamment, la différence entre les variétés analysées dans les études, par la méthode d'extraction utilisée qui est souvent la chromatographie en phase ionique qui est une méthode de la même famille que la chromatographie en phase liquide (HPLC) mais avec la particularité d'être méthode très sensible avec des limites de détection très petites par rapport à la HPLC «normale», par le fait que nos analyses ont été réalisées sur des graines entières, ou par les conditions de cultures ou des régions géographiques où ces variétés furent semées. En effet, une étude de (Sytar et al., 2016) montre que les teneurs en acides aminés dans les graines de sarrasin peuvent varier d'une région à une autre. Malgré ces différences de concentration, les teneurs en acides aminés essentiels et totaux que nous avons mesurés restent importants et sont en accord avec d'autres études qui montrent que la teneur en acides aminés essentiels et totaux dans le sarrasin est plus élevée que dans les céréales courantes tel le blé (W. Biel et al., 2014). D'après (Sujak et al., 2006), en plus de la lysine, les teneurs en méthionine et cystéine dans les graines de sarrasin sont élevées, ce qui en fait une bonne source de protéines complémentaire aux légumineuses. Les teneurs que nous avons observé en cystéine (2 mg/100g) et en méthionine (1.5 mg/100 g) étaient semblables à celle obtenues par Bonafaccia et al., (2003) dans le son et la farine. Concernant le tryptophane, (Wioletta Biel & Maciorowski, 2013) ont montré qu'il était plus abondant dans le gruau et le son et que les plus faibles teneurs se retrouvaient dans la coque. Comme l'ont montré (Jun Kayashita et al., 1995), les protéines de sarrasin dans le régime alimentaire des rats a contribué de manière significative à la réduction du cholestérol dans leur sang, leur foie et leur vésicule biliaire, et a également inhibé la formation de calculs biliaires à la suite de modifications du métabolisme du cholestérol. Ce qui nous amène alors à penser que les extraits protéiques du sarrasin pourraient réduire le niveau de LDL et VLDL et ainsi prévenir le cancer colorectal en réduisant la prolifération des cellules tumorales (Sytar et al, 2018).

2) Effet de la température et du stress hydrique sur la croissance végétative, la physiologie, la reproduction, et la qualité des graines.

Les résultats de nos analyses ont mis en évidence un effet de la température et du stress hydrique durant tout le cycle de vie et la physiologie des plantes chez l'espèce *F. tataricum*. Certes, deux variétés de la même espèce ont été analysées, mais chacune d'elles a répondu différemment à une hausse de température et au stress hydrique, si bien que pour certains paramètres l'effet du stress hydrique a varié en fonction de la température.

Des deux variétés, Zlata s'est montrée la plus robuste, car bien que l'effet du stress hydrique s'est observé à 21° et 29°C, elle a produit plus de feuilles en fin de culture avec une surface foliaire plus grande, des plantes plus hautes, avec plus de branches et a formé plus de nœuds que la variété Izlek aux deux températures. L'impact des stress sur le poids a varié selon la variété. Le poids frais des feuilles chez Zlata était affecté par la température et le stress hydrique mais seul le stress hydrique a affecté le poids de ses tiges tandis que chez la variété Izlek, le poids des feuilles ne diminuait que sous l'effet du stress hydrique et le poids de ses tiges baissait sous les 2 effets. L'étude de Aubert (2019) sur l'impact des hautes températures sur la croissance et la reproduction chez deux variétés de *F. Tataricum* a confirmé en partie nos résultats car nos résultats montraient que le poids sec des feuilles étaient plus élevés à 29°C qu'à 21°C et l'effet des 2 stress avaient réduit le poids frais des tiges chez la variété Izlek. Même si on observait une robustesse des plantes plus importante chez la variété Zlata, il est important de souligner que la température et le stress hydrique ont diminué toutes les parties des plantes citées plus haut chez les deux variétés du sarrasin de Tartarie

Chez la variété Zlata, la production des feuilles augmentait avec la température contrairement à la variété Izlek de la même espèce. Drugmand (2020) a aussi observé, comme pour Izlek, que la production de feuilles n'augmentait pas avec la température chez la variété Darja de l'espèce *F. esculentum*. Certaines plantes tolèrent des températures élevées en augmentant leur taux de transpiration et/ou leur surface transpiratoire, notamment en augmentant le nombre de feuilles et leur surface (Prasad et al., 2008) ce qui pourrait expliquer cette particularité chez la variété Zlata. Cependant bien que le nombre de feuilles et le taux de transpiration aient augmenté chez cette dernière avec la température, ce ne fut pas le cas pour la surface foliaire.

A 21° C, chez la variété Izlek le stress hydrique n'entraîna pas une diminution de la production de feuilles, cela pourrait s'expliquer par le fait que certains géotypes des plantes possèdent la capacité d'éviter l'effet du stress hydrique soit en augmentant l'absorption d'eau ou en réduisant

les pertes d'eau des feuilles, en réduisant le nombre de feuilles et la surface foliaire (Berger, Palta et Vadez, 2016; Connor et Jones, 1985). En effet, Izlek a été capable de maintenir sa production de feuilles et leur teneur en eau et a réduit la surface foliaire en réponse au stress hydrique à 21°C. Au contraire d'Izlek, le stress hydrique a affecté la production de feuilles aux deux températures chez la variété Zlata et cet effet était particulièrement marqué à 29°C. Il est en effet courant que la combinaison d'une hausse de température et d'un stress hydrique ait un effet plus important que chacun des deux facteurs séparément (Barnabás et al., 2008)

Concernant la surface foliaire, la température et le stress hydrique l'ont diminué chez les deux variétés étudiées. Les études faites par Stone & Wilson (2012), Salah & Tardieu, (1997), Çakir, (2004) montraient que les surfaces foliaires des plantes soumises à une haute température et en état de stress hydrique présentaient une surface plus petite que les plantes bien arrosées, ce qui confirme nos observations. Yang et al., (2009) affirmaient qu'une petite réduction du potentiel hydrique diminuait la surface foliaire chez le maïs. Nous n'avons pas mesuré le potentiel hydrique dans notre étude et ne pouvons donc confirmer cette observation. Cependant la teneur en eau des feuilles n'a pas été modifiée par la température et le stress hydrique chez la variété Izlek tandis que chez la variété Zlata, celle-ci n'a pas été modifiée par la température mais a diminué avec le stress hydrique. La production de petites feuilles permet de limiter la perte en eau par transpiration en diminuant la surface en contact avec l'air (Chutia & Borah, 2012; Tardieu, 2005). Le taux de transpiration et la conductance stomatique ont été affectés par le stress chez les deux variétés dans notre expérience, ce qui a montré une adaptation au niveau de l'ouverture des stomates pour limiter la perte en eau.

Prasad et al. (2008) affirmaient qu'une hausse de température réduisait la hauteur des plantes mais nos résultats montraient qu'en plus de l'effet de la température, le stress hydrique a également réduit la taille des plantes si bien qu'elles étaient plus hautes à 21°C qu'à 29°C et chez les plantes bien arrosées que chez les plantes stressées pour les 2 variétés de *F. tataricum*. Cependant le contraire fut observé dans l'étude faite par Drugmand (2020) sur la variété Darja de *F. esculentum* où il affirmait que la taille des plantes étaient plus hautes à 28°C qu'à 21°C ce qui pourrait s'expliquer par le fait que les deux espèces du sarrasin ne répondent pas de la manière face aux stress. Le stress hydrique a généralement moins d'impact sur la hauteur des plantes que la température comme l'a montré Xiang et al., (2013) chez le sarrasin de Tartarie et Descamps et al. (2018) chez la bourrache. Mais pour certaines plantes comme le sésame, le cotonnier et la vigne l'effet du stress hydrique réduisait la taille de leur plante (Attia, 2007)

En plus des paramètres de croissance, les températures élevées et le stress hydrique modifient de nombreux processus physiologiques au cours du cycle de vie des plantes (Descamps et al., 2018). Par exemple, la température est un facteur externe qui favorise l'ouverture des stomates pour permettre un refroidissement de la température foliaire par l'évaporation de l'eau (Qaderi et al., 2012; Salah & Tardieu, 1997). Plus la température est élevée, plus les stomates s'ouvriront et plus le taux de transpiration sera élevée, mais ce phénomène se produit jusqu'à ce que la température atteigne un seuil, et au-delà de ce seuil les stomates se referment entraînant une baisse de la transpiration pour éviter que la plante se dessèche (Xiang et al., 2013). En opposition à cela, la plante aura tendance à fermer ces stomates en réponse au stress hydrique pour limiter la transpiration et la perte d'eau (Descamps et al., 2018; Yang et al., 2009) Ces deux phénomènes se sont observés chez les 2 espèces de *F. tataricum* étudiées. La hausse de la température augmentait la conductance stomatique tandis que le stress hydrique la diminuait. Il en a résulté que le taux de transpiration a augmenté avec la température chez Zlata et a diminué avec le stress hydrique chez Islek en début de culture. Une réduction de la conductance stomatique conduit à une plus grande conservation de l'eau (Qaderi et al., 2012), ce qui a permis de maintenir la teneur en eau des tiges et des feuilles chez Islek et des tiges chez Zlata mais la fermeture des stomates chez Zlata n'a pas été suffisante que pour empêcher une diminution de la teneur en eau des feuilles en stress hydrique. Comme mentionné précédemment, il est connu qu'une feuille plus petite transpire moins vite qu'une feuille avec une surface foliaire plus importante, car il y'a moins de pores disponibles pour la perte d'eau (Cascone et al., 2019; Catola et al., 2018). Nos résultats montraient que le taux de transpiration chez les plantes de la variété Izlek qui présentait une surface foliaire plus petite diminuait avec le stress hydrique quelle que soit la température, tandis qu'il augmentait avec la température chez les plantes de la variété Zlata qui présentait une surface foliaire beaucoup plus grande.

La fermeture des stomates résultant du stress hydrique réduit l'absorption de CO₂, conduisant ainsi à l'inhibition de la photosynthèse (Barnabás et al., 2008; Descamps et al., 2018). Par conséquent, la fixation du CO₂ est réduite et le taux de photosynthèse diminue, ce qui entraîne une production de moins d'assimilats pour la croissance et le rendement des plantes (Salvucci & Crafts-Brandner, 2004). Etant donné que, le CO₂ pénètre dans les feuilles à travers les mêmes ouvertures (les stomates) que l'eau qui sort des feuilles, il existe alors une bonne relation entre la quantité d'eau évaporée et la matière sèche qui est produite par la culture (Sadiq et al., 1994). Ce qui expliquerait la diminution du poids sec des tiges et des feuilles sous l'effet du stress hydrique chez la variété Zlata en particulier. En effet, le taux de photosynthèse net diminuait

avec le stress hydrique chez cette dernière en début de culture. Des études faites par (Nahar et al., 2015; Salah & Tardieu, 1997; Yang et al., 2009) montraient que l'effet des stress abiotiques notamment le stress hydrique et les hautes températures diminuaient la photosynthèse qui à son tour réduisait le taux d'assimilation des nutriments chez le maïs , le mil et le blé.

Nos résultats montraient de manière générale que les deux stress agissaient sur les paramètres photosynthétiques, la hausse de la température augmentait la teneur en chlorophylle, la concentration intracellulaire en CO₂ et la photosynthèse nette tandis que le stress hydrique augmentait la teneur en chlorophylle chez les deux variétés, augmentait la concentration intracellulaire chez Izlek mais la réduisait chez la variété Zlata , ce qui s'explique par la faible conductance stomatique chez les plantes stressées. Une augmentation des concentrations en chlorophylles avec le stress hydrique a aussi été observée chez le sarrasin commun (Drugmand, 2020) et peut être due à un effet de concentration suite à la réduction de la surface foliaire. Selon l'étude de (Chutia & Borah, 2012), le stress hydrique a réduit la teneur en chlorophylle chez le riz traditionnel (*Oriza sativa linn.*) sans toutefois modifier le rendement en grains, ce qui suggère que la teneur en chlorophylle seule n'explique pas tout. Dans notre étude, à mi-culture (4^{ème} semaine), la concentration intercellulaire en CO₂ était plus élevée à haute température chez les plantes témoins qui avaient une conductance stomatique plus grande, mais en fin de culture (8^{ème} semaine) la concentration intercellulaire diminuait suite à la baisse de la conductance stomatique. De même, le taux de photosynthèse net était affecté par la température et le stress hydrique à mi-culture mais plus en fin de culture. Des mécanismes d'adaptation ont sans doute eu lieu en cours de culture afin de maintenir la photosynthèse. Il est important de savoir que la conductance stomatique n'est pas le seul moyen de réguler la diffusion du CO₂. D'autres processus jouent un rôle important dans leur régulation tels que les processus photochimiques qui dépendent de l'éclairement, les processus de photorespiration, les processus biochimiques de carboxylation qui sont exprimés par la concentration en CO₂ aux niveau des sites enzymatiques de la Rubisco et par la résistance à la carboxylation , et enfin les processus de diffusion du CO₂ entre l'air ambiant et la Rubisco (Casiraghi et al.,2020; Salvucci & Crafts-Brandner, 2004 ;Verhoeven, 1996) mais aucun de ces processus n'a été étudié dans le cadre de ce mémoire.

Le stress thermique est souvent aussi associé au stress hydrique et de ce fait limite la croissance des organes reproducteurs qui vont à leur tour affecter négativement le rendement (Khila et al., 2015)

Nos résultats montraient que le rythme d'apparition des inflorescences était fort différent entre les 2 variétés du *F. tataricum*. L'apparition d'inflorescences a commencé plus tôt chez la variété Izlek que chez la variété Zlata mais pour finir la variété Zlata a produit plus d'inflorescences qu'Izlek aussi bien à 21°C qu'à 29°C. Ces observations corroborent les résultats obtenus précédemment par Aubert (2019). Dans notre étude, la production d'inflorescences a été affectée tant par la température que par le stress hydrique chez les deux variétés bien que l'effet du stress hydrique a surtout été observé à 29°C. Par contre, la production de graines a surtout été affectée par la température. La température a aussi affecté le temps de floraison. Chez les 2 variétés à 29°C, la floraison commença très tôt, dès la première semaine après le début du traitement, ce phénomène fut aussi observé chez *F. esculentum* en réponse aux hautes températures (Cepková et al., 2009) La température est souvent considérée comme un facteur affectant la reproduction. .et al., (2015) affirment que le stress à haute température est l'un des stress les plus néfastes menaçant la productivité et la survie des plantes et que chaque augmentation de la température moyenne de la saison de croissance pourrait diminuer le rendement des cultures.

A 21°C, après 30 jours de culture chez la variété Izlek, on observait un pic de production d'inflorescences due à l'effet de la température ensuite une baisse du nombre d'inflorescences en anthèse suite à la fructification. Le nombre d'inflorescences était similaire entre les plantes témoins et stressées, si bien que la production des graines fut abondante à 21°C et ne fut pas affecté par le stress hydrique. Mais à 29°C, le stress hydrique diminuait la production d'inflorescences, mais la production de graines fut particulièrement influencée par la température, car très peu de graines ont été formées. Tant le stress thermique que le stress hydrique peuvent affecter la fertilité des fleurs et le développement des graines Deschamps et al., (2018) ce qui explique la faible production de graines à 29°C en stress hydrique. Cependant, Aubert (2019) a montré que ni la viabilité pollinique, ni le nombre de grains de pollen, ni la réceptivité stigmatique n'ont été affecté par la température chez la variété Izlek. Par contre, elle a observé un taux important de graines Izlek avortées à 28°C par rapport à 21°C (Aubert, 2019), ce qui suggère que le développement des graines est affecté par la température chez cette variété. Contrairement à la variété Izlek, la production d'inflorescences a été progressive chez la variété Zlata et plus abondantes chez les plantes témoins à 29°C mais l'effet du stress

hydrique s'est fait ressentir à partir du 30^{ième} jour. (Cepková et al., 2009) affirmaient que chez certaines espèces tel *F. esculentum* la floraison était souvent prolongée à haute température, ce qui permettait le développement de plus fleurs. Par ailleurs, chez Zlata, l'effet du stress hydrique s'est fait ressentir sur la production d'inflorescences vers la fin de la culture à 21°C et durant toute la culture à 29°C en réduisant le nombre d'inflorescences. Tout comme sa production d'inflorescences, la production des graines chez Zlata augmentait avec le temps et même chez les témoins à 29°C par contre, très peu de graines ont été produites en stress hydrique à 29°C. Aubert et al (2019) a montré que chez cette variété, la hausse de température réduisait le nombre de grains de pollen par anthère et augmentait l'avortement des graines. La phase reproductive est souvent considérée comme plus sensible aux stress abiotiques que la phase végétative et le développement du pollen est particulièrement vulnérable (Jagadish et al., 2020).

Les graines ont majoritairement été formées à 21°C chez les 2 variétés du *F. tataricum* et donc très peu ont été formées à 29°C. Ceci confirme ce qui est rapporté dans la littérature, que le sarrasin est une espèce qui se développe de manière optimale dans la plage de températures allant de 18 à 23-25°C (Chaussat & Neiter, 2015; Farooq et al., 2016; Lim, 2013). Bien que la production de graines fût affectée par la hausse de température et le stress hydrique chez les deux variétés, l'effet sur le poids des graines a varié selon la variété. Le stress hydrique n'a pas eu d'effet sur les poids frais et sec des graines de la variété Izlek aux 2 températures, tandis que les poids frais et sec des graines de la variété Zlata furent affectés par les 2 stress. L'effet de la hausse de température affecta le poids des grains (Olufayo et al., 1997). Etant donné la faible production de graines à 29°C, seules les graines obtenues à 21°C ont été utilisées pour le dosage des minéraux. Chez les 2 variétés de *F. tataricum*, les teneurs en Cu, Fe, Mg, et Zn étaient similaires mais le stress hydrique a réduit les teneurs en Cu chez les 2 variétés. Les teneurs en minéraux dans les graines différaient entre la culture en serres et en champ pour les 2 variétés de *F. tataricum*. Si les teneurs en Cu et en Mg étaient similaires, les graines cultivées en serres contenaient plus de Fe, de K et de Zn qu'en champ. Tout comme le sorgho, le sarrasin est particulièrement riche en K suivi du Mg et le microélément le plus abondant est le Fe (Martínez-Villaluenga et al., 2020; Paiva et al., 2017). Nos résultats ont montré que les graines de la variété Izlek contenaient des teneurs plus élevées en K que la variété Zlata mais chez cette dernière, le stress hydrique augmentait la teneur en K dans ses graines. Contrairement au sarrasin, le stress hydrique réduisait les teneurs en Mg chez le sorgho et en Fe chez le blé (Paiva et al., 2017)

Conclusion

Les bienfaits du sarrasin sur la santé ont longtemps été évoqués dans la littérature. Mais les analyses faites dans le cadre de ce mémoire nous ont permis de confirmer une partie des nombreuses qualités nutritionnelles du sarrasin. Les deux espèces de sarrasin analysées ont montrées des teneurs élevées en minéraux en particulier en Mg et K or ces minéraux ont un effet hautement bénéfique sur la santé, de bonnes teneurs en protéines surtout chez l'espèce *F. esculentum* et enfin des teneurs en acides aminés essentiels et semi-essentiels élevés et similaires entre les 2 espèces mais avec une teneur en proline élevée chez l'espèce *F. tataricum*. Au vu de ces résultats, la culture du sarrasin peut donc être considérée comme une ressource importante pour le développement des aliments fonctionnels.

Cependant depuis des décennies, nous faisons face à un réchauffement qui se ressent de plus en plus dans notre quotidien et aucune plante n'est épargnée. Le stress thermique et le stress hydrique ont tous deux eu un impact sur la croissance végétative, la reproduction et l'activité physiologique des deux variétés de *F. Tataricum* mais elles ont réagi différemment face à ces stress. D'une manière générale, la variété Izlek a été plus impacté par la température que par le stress hydrique surtout à haute température, tandis que la variété Zlata fut assez sensible au stress hydrique et thermique. Pour résister à cette hausse de température la variété Zlata a produit plus de feuilles et d'inflorescences.

Cependant les 2 variétés ont répondu de la même manière face au stress hydrique à haute température en produisant moins de feuilles, d'inflorescences et de graines. Les plantes de ces 2 variétés ont donc mis en place des mécanismes de résistance en augmentant leur conductance stomatique et leur taux de transpiration, en réduisant leur surface foliaire pour ainsi réduire la température de la plante en réponse à la hausse des températures. Par contre, le stress hydrique a réduit la conductance stomatique pour garantir une meilleure rétention d'eau dans les feuilles et les tiges.

L'espèce *F. tataricum* comprend plus d'une vingtaine de variétés, et au terme de notre analyse, nous ne pouvons extrapoler l'hypothèse que l'espèce du *F. tartaricum* soit plus résistant au stress thermique ou hydrique car chacune de des deux variétés étudiées (Zlata et Izlek) a réagi différemment face aux stress. Cependant un point sur lequel nous restons tous unanimes est que le stress thermique ajouté au stress hydrique est préjudiciable pour un bon rendement en quantité et qualité aussi bien des graines que des feuilles.

Perspectives

Suite à mon intérêt particulier pour la nutrition, je souhaite proposer quelques perspectives dans ce sens à la suite de mon travail.

Nos analyses sur la qualité nutritionnelle ont porté sur les graines entières de chaque espèce du sarrasin. Pour mieux confirmer d'autres analyses et les comparer avec les nôtres, il serait intéressant d'aussi analyser les teneurs en minéraux, protéines, acides aminés séparément dans le son, le germe et l'albumen. De plus, faire une analyse poussée du type et des proportions de protéines (albumines, globulines et prolamines...) présentes dans les graines des 2 espèces de sarrasin permettrait d'affiner l'étude des teneurs en protéines.

Concernant l'impact des changements climatiques sur la qualité des graines, il serait également intéressant de doser la teneur en rutine dans les graines des variétés Izlek et Zlata et de voir le sens de l'évolution de leur teneur lorsqu'elles font face à un stress hydrique ou thermique. En effet la rutine est un antioxydant clé du sarrasin et a de nombreuses propriétés médicinales. Par ailleurs, en plus des variétés Zlata et Izlek il serait intéressant d'analyser d'autres variétés de l'espèce *F. tataricum* comme la variété allemande Lifago ou d'autres et en plus grand nombre pour davantage comprendre le comportement de cette espèce face aux stress induits. La lumière joue un rôle capital dans l'activité photosynthétique en permettant la synthèse de la matière organique via les bactéries photoautotrophes c'est-à-dire que ces bactéries utilisent le dioxyde de carbone comme une source de carbone et la lumière comme une source d'énergie.

Il serait également intéressant d'ajouter en plus un troisième facteur, une intensité lumineuse faible et forte, pour observer le comportement de cette espèce lorsqu'elle fera face à ces 3 facteurs : produira-t-elle plus d'inflorescences, de feuilles ou graines ? L'activité photosynthétique sera-t-elle accélérée ou ralentie ?

Bibliographie

- Aguilar, E. G., Albarracín, G. de J., Uñates, M. A., Piola, H. D., Camiña, J. M., & Escudero, N. L. (2015). Evaluation of the nutritional quality of the grain protein of new amaranths varieties. *Plant Foods for Human Nutrition (Dordrecht, Netherlands)*, 70(1), 21-26. <https://doi.org/10.1007/s11130-014-0456-3>
- Almeselmani, M., Deshmukh, P. S., Sairam, R. K., Kushwaha, S. R., & Singh, T. P. (2006). Protective role of antioxidant enzymes under high temperature stress. *Plant Science*, 171(3), 382-388. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2006.04.009>
- Alonso-Miravalles, L., & O'Mahony, J. A. (2018). Composition, Protein Profile and Rheological Properties of Pseudocereal-Based Protein-Rich Ingredients. *Foods (Basel, Switzerland)*, 7(5). <https://doi.org/10.3390/foods7050073>
- André, J.-C., Royer, J.-F., & Chauvin, F. (2008). Les cyclones tropicaux et le changement climatique. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(9), 575-583. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2008.07.003>
- Attia, F. (2007). *Effet du stress hydrique sur le comportement écophysiological et la maturité phénolique de la vigne Vitis vinifera L. : Étude de cinq cépages autochtones de Midi-Pyrénées* [Phd]. <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000654/>
- Aubert, L. (2019). *Impacts des hautes températures sur la croissance, la reproduction et la qualité antioxydante de deux espèces de Fagopyrum*. Mémoire.
- Babu, S., Yadav, G., Singh, R., Avasthe, R., Das, A., Mohapatra, K., Tahashildar, M., Kumar, K., Thoithoi, M., Devi, Rana, D., Pande, P., & Prakash, N. (2019). Production technology and multifarious uses of buckwheat (*Fagopyrum* spp.): A review. *Indian Journal of Agronomy*, 63, 415-427.
- Barnabás, B., Jäger, K., & Fehér, A. (2008). The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant, Cell & Environment*, 31(1), 11-38. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01727.x>
- Battu, C. (2017). L'accompagnement nutritionnel d'un patient souffrant d'une maladie cœliaque. *Actualités Pharmaceutiques*, 56(567), 55-58. <https://doi.org/10.1016/j.actpha.2017.03.040>

- Besancenot, J.-P., Sindt, C., & Thibaudon, M. (2019). Pollen et changement climatique. Bouleau et graminées en France métropolitaine. *Revue Française d'Allergologie*, 59(8), 563-575. <https://doi.org/10.1016/j.reval.2019.09.006>
- Bhinder, S., Kaur, A., Singh, B., Yadav, M. P., & Singh, N. (2020). Proximate composition, amino acid profile, pasting and process characteristics of flour from different Tartary buckwheat varieties. *Food Research International*, 130, 108946. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108946>
- Biel, W., Jacyno, E., & Kawęcka, M. (2014). Chemical composition of hulled, dehulled and naked oat grains. *South African Journal of Animal Science*, 44(2), 189-197. <https://doi.org/10.4314/sajas.v44i2.12>
- Biel, Wioletta, & Maciorowski, R. (2013). Evaluation of chemical composition and nutritional quality of buckwheat groat, bran and hull (*Fagopyrum esculentum* Möench L.). *Italian Journal of Food Science*, 25, 384-389.
- Bilal, T., Malik, Tahir, I., & Rehman, R. (2013, août 21). *Buckwheat : An introspective and future perspective with reference to Kashmir Himalayas*.
- Bonafaccia, G., Gambelli, L., Fabjan, N., & Kreft, I. (2003). Trace elements in flour and bran from common and tartary buckwheat. *Food Chemistry - FOOD CHEM*, 83, 1-5. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(03\)00228-0](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00228-0)
- Bonafaccia, G., Marocchini, M., & Kreft, I. (January 31, 2003a). Composition and technological properties of the flour and bran from common and tartary buckwheat. *Food Chemistry - 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)
- Çakir, R. (2004). Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*, 89(1), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.005>
- Campbell, C. G. (1997). *Buckwheat : Fagopyrum esculentum Moench*. IPGRI.
- Cascone, S., Coma, J., Gagliano, A., & Pérez, G. (2019). The evapotranspiration process in green roofs : A review. *Building and Environment*, 147, 337-355. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.024>

- Casiraghi, F. M., Landi, M., Donnini, S., Borlotti, A., Zocchi, G., Guidi, L., & Vigani, G. (2020). Modulation of photorespiration and nitrogen recycling in Fe-deficient cucumber leaves. *Plant Physiology and Biochemistry*, *154*, 142-150. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.05.032>
- Catola, S., Centritto, M., Cascone, P., Ranieri, A., Loreto, F., Calamai, L., Balestrini, R., & Guerrieri, E. (2018). Effects of single or combined water deficit and aphid attack on tomato volatile organic compound (VOC) emission and plant-plant communication. *Environmental and Experimental Botany*, *153*, 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.05.001>
- Cepková, P., Janovská, D., & Stehno, Z. (2009). Assessment of genetic diversity of selected tartary and common buckwheat accessions. *Spanish journal of agricultural research, ISSN 1695-971X, N° 4, 2009, pags. 844-854, 7*. <https://doi.org/10.5424/sjar/2009074-1098>
- Chaussat, A.-G., & Neiter, D. (2015). *Le sarrasin à l'épreuve du mauvais temps (XVIIIe et XIXe siècles)*.
- Chutia, J., & Borah, S. P. (2012). Water Stress Effects on Leaf Growth and Chlorophyll Content but Not the Grain Yield in Traditional Rice (*Oryza sativa* Linn.) Genotypes of Assam, India II. Protein and Proline Status in Seedlings under PEG Induced Water Stress. *American Journal of Plant Sciences*, *3*(7), 971-980. <https://doi.org/10.4236/ajps.2012.37115>
- Dahan Dalmedico, A., & Guillemot, H. (2006). Changement climatique : Dynamiques scientifiques, expertise, enjeux géopolitiques. *Sociologie du Travail*, *48*(3), 412-432. <https://doi.org/10.1016/j.soctra.2006.05.001>
- Delpérée, C., Kinet, J., & Lutts, S. (2003). *Low irradiance modifies the effect of water stress on survival and growth-related parameters during the early developmental stages of buckwheat (Fagopyrum esculentum)*. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2003.00170.x>
- Descamps, C., Quinet, M., Baijot, A., & Jacquemart, A.-L. (2018). Temperature and water stress affect plant–pollinator interactions in *Borago officinalis* (Boraginaceae). *Ecology and Evolution*, *8*(6), 3443-3456. <https://doi.org/10.1002/ece3.3914>
- Drugmand, J. (2020). *Impact des stress thermique et hydrique sur la croissance, la reproduction et la pollinisation de Fagopyrum esculentum et comparaison de la pollinisation chez deux espèces de Fagopyrum*.

- Duong, M. H. (2000). Perspectives sur le changement climatique. *Natures Sciences Sociétés*, 8(4), 5-14.
[https://doi.org/10.1016/S1240-1307\(01\)80002-9](https://doi.org/10.1016/S1240-1307(01)80002-9)
- Dziedzic, K., Szwengiel, A., Górecka, D., Rudzińska, M., Korczak, J., & Walkowiak, J. (2016). The effect of processing on the phytosterol content in buckwheat groats and by-products. *Journal of Cereal Science*, 69, 25-31. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.02.003>
- 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. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(22), 6452-6455. <https://doi.org/10.1021/jf034543e>
- FAOSTAT. (2020). *FAOSTAT*. <http://www.fao.org/faostat/fr/#data/QC/visualize>
- Farooq, S., Rehman, R. U., Pirzadah, T. B., Malik, B., Dar, F. A., & Tahir, I. (2016). Cultivation, Agronomic Practices, and Growth Performance of Buckwheat. In M. Zhou, I. Kreft, S.-H. Woo, N. Chrungoo, & G. Wieslander (Éds.), *Molecular Breeding and Nutritional Aspects of Buckwheat* (p. 299-319). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803692-1.00023-7>
- Gulpinar, A. R., Erdogan Orhan, I., Kan, A., Senol, F. S., Celik, S. A., & Kartal, M. (2012). Estimation of in vitro neuroprotective properties and quantification of rutin and fatty acids in buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) cultivated in Turkey. *Food Research International*, 46(2), 536-543. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.08.011>
- Halbreccq, B., Romedenne, P., & Ledent, J. F. (2005). Evolution of flowering, ripening and seed set in buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench): Quantitative analysis. *European Journal of Agronomy*, 23(3), 209-224. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.11.006>
- Han, F., Han, F., Wang, Y., Fan, L., Song, G., Chen, X., Jiang, P., Miao, H., & Han, Y. (2019). Digestible indispensable amino acid scores of nine cooked cereal grains. *The British Journal of Nutrition*, 121(1), 30-41. <https://doi.org/10.1017/S0007114518003033>
- Hunt, H. V., Shang, X., & Jones, M. K. (2018). Buckwheat: A crop from outside the major Chinese domestication centres? A review of the archaeobotanical, palynological and genetic evidence. *Vegetation History and Archaeobotany*, 27(3), 493-506. <https://doi.org/10.1007/s00334-017-0649-4>

- Ikanovic, J., Rakic, S., Popovic, V., Jankovic, S., Glamoclija, D., & Kuzevski, J. (2013). Agro-ecological conditions and morpho-productive properties of buckwheat. *Biotechnology in Animal Husbandry*, 29, 555-562. <https://doi.org/10.2298/BAH1303555I>
- Jacquemart, A.-L., Cawoy, V., Kinet, J.-M., LEDENT, J.-F., & Quinet, M. (2012). Is Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) Still a Valuable Crop Today? *European Journal of Plant Science and Biotechnology*, 1-10.
- Jacquemart, A.-L., Gillet, C., & Cawoy, V. (2007). Floral visitors and the importance of honey bee on buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) in central Belgium. *Journal of Horticultural Sciences and Biotechnology*, 82. <https://doi.org/10.1080/14620316.2007.11512205>
- Joshi, B. (2014). Farmers' Knowledge on and On-station Characterization of Bhate Phaper (Rice Tartary Buckwheat). *Nepal Agriculture Research Journal*, 14, 44-52.
- Joshi, D. C., Chaudhari, G. V., Sood, S., Kant, L., Pattanayak, A., Zhang, K., Fan, Y., Janovská, D., Meglič, V., & Zhou, M. (2019). Revisiting the versatile buckwheat : Reinvigorating genetic gains through integrated breeding and genomics approach. *Planta*, 250(3), 783-801. <https://doi.org/10.1007/s00425-018-03080-4>
- Juhász, A., Colgrave, M. L., & Howitt, C. A. (2020). Developing gluten-free cereals and the role of proteomics in product safety. *Journal of Cereal Science*, 93, 102932. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102932>
- Kadyrova, L. R., & Mukhametshina, R. R. (2015). Pollen productivity and fertility of pollen in the genus *Fagopyrum* mill. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 6, 1695-1702.
- Kalinova, J., & Moudrý, J. (2003). Evaluation of frost resistance in varieties of common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench). *Plant, Soil and Environment*, 49. <https://doi.org/10.17221/4145-PSE>
- Kato, N., Kayashita, J., & Sasaki, M. (2000). Physiological functions of buckwheat protein and sericin as resistant proteins. *Nippon Eiyo Shokuryo Gakkaishi = Journal of the Japanese Society of Nutrition and Food Science*, 53(2), 71-75.

- Kayashita, J., Shimaoka, I., Nakajoh, M., Yamazaki, M., & Kato, N. (1997). Consumption of buckwheat protein lowers plasma cholesterol and raises fecal neutral sterols in cholesterol-Fed rats because of its low digestibility. *The Journal of Nutrition*, *127*(7), 1395-1400. <https://doi.org/10.1093/jn/127.7.1395>
- Kayashita, Jun, Shimaoka, I., & Nakajoh, M. (1995). Hypocholesterolemic effect of buckwheat protein extract in rats fed cholesterol enriched diets. *Nutrition Research*, *15*(5), 691-698. [https://doi.org/10.1016/0271-5317\(95\)00036-I](https://doi.org/10.1016/0271-5317(95)00036-I)
- Khan, F., Arif, M., Khan, T. U., Khan, M. I., & Bangash, J. A. (2013). *NUTRITIONAL EVALUATION OF COMMON BUCKWHEAT OF FOUR DIFFERENT VILLAGES OF GILGIT-BALTISTAN*. </paper/NUTRITIONAL-EVALUATION-OF-COMMON-BUCKWHEAT-OF-FOUR-Khan-Arif/cfe448dc7d61024ea8081fd97234d87122c8dca0>
- Khan, K., & Shrewry, P. R. (2009). Wheat : Chemistry and Technology: Fourth Edition. In *Wheat : Chemistry and Technology : Fourth Edition* (p. 467).
- Khila, B., Douh, B., Amel, M., & A, B. (2015). EFFETS DE LA CONTRAINTE HYDRIQUE ET DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA PRODUCTIVITE DU BLE DUR EN CONDITIONS CLIMATIQUES SEMI ARIDES DE TUNISIE. *Larhyss Journal*, *23*, 69-85.
- Kim, S.-J., Zaidul, I. S. M., Suzuki, T., Mukasa, Y., Hashimoto, N., Takigawa, S., Noda, T., Matsuura-Endo, C., & Yamauchi, H. (2008). Comparison of phenolic compositions between common and tartary buckwheat (*Fagopyrum*) sprouts. *Food Chemistry*, *110*(4), 814-820. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.02.050>
- Lachmann, S., & Adachi, T. (1990). Studies on the Influence of Photoperiod and Temperature on Floral Traits in Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) under Controlled Stress Conditions. *Plant Breeding*, *105*(3), 248-253. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.1990.tb01202.x>
- Lee, W., Ku, S.-K., & Bae, J.-S. (2013). Emodin-6-O- β -D-glucoside down-regulates endothelial protein C receptor shedding. *Archives of Pharmacal Research*, *36*(9), 1160-1165. <https://doi.org/10.1007/s12272-013-0114-6>

- Lehmann, U., & Robin, F. (2007). Slowly digestible starch – its structure and health implications : A review. *Trends in Food Science & Technology*, 18(7), 346-355. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.02.009>
- Lim, T. K. (2013). Fagopyrum esculentum. In T. K. Lim (Éd.), *Edible Medicinal And Non-Medicinal Plants : Volume 5, Fruits* (p. 459-493). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5653-3_25
- Maki, K. C., Eren, F., Cassens, M. E., Dicklin, M. R., & Davidson, M. H. (2018). ω -6 Polyunsaturated Fatty Acids and Cardiometabolic Health : Current Evidence, Controversies, and Research Gaps. *Advances in Nutrition*, 9(6), 688-700. <https://doi.org/10.1093/advances/nmy038>
- 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 and Chemical Toxicology*, 137, 111178. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2020.111178>
- Motta, C., Castanheira, I., Gonzales, G. B., Delgado, I., Torres, D., Santos, M., & Matos, A. S. (2019). Impact of cooking methods and malting on amino acids content in amaranth, buckwheat and quinoa. *Journal of Food Composition and Analysis*, 76, 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2018.10.001>
- Nahar, K., Hasanuzzaman, M., Ahamed, K. U., Hakeem, K. R., Ozturk, M., & Fujita, M. (2015). Plant Responses and Tolerance to High Temperature Stress : Role of Exogenous Phytoprotectants. In K. R. Hakeem (Éd.), *Crop Production and Global Environmental Issues* (p. 385-435). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23162-4_17
- Olufayo, A. A., Ruelle, P., Baldy, C., & Aidaoui, A. (1997). Biomass of grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) under variable water regime. *Biomass and Bioenergy*, 12(5), 383-386. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(97\)00008-1](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)00008-1)
- Pachauri, R. K., Meyer, L. A., & Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat. (2015). *Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse*.
- Paiva, C. L., Queiroz, V. A. V., Simeone, M. L. F., Schaffert, R. E., de Oliveira, A. C., & da Silva, C. S. (2017). Mineral content of sorghum genotypes and the influence of water stress. *Food Chemistry*, 214, 400-405. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.067>

- Pantoa, T., Kubota, M., Suwannaporn, P., & Kadowaki, M. (2020). Characterization and bioactivities of young rice protein hydrolysates. *Journal of Cereal Science*, 95, 103049. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103049>
- Pavek, P.-N., & Pullman, W. (2014). *Evaluation of Cover Crops and Planting Dates for Dryland Rotations in Eastern Washington*. 14.
- Peng, L.-X., Wang, J.-B., Hu, L.-X., Zhao, J.-L., Xiang, D.-B., Zou, L., & Zhao, G. (2013). Rapid and simple method for the determination of emodin in tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) by high-performance liquid chromatography coupled to a diode array detector. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(4), 854-857. <https://doi.org/10.1021/jf304804c>
- Podolska, G. (2016). *The Effect of Habitat Conditions and Agrotechnical Factors on the Nutritional Value of Buckwheat*: (p. 283-297). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803692-1.00022-5>
- Pongrac, P., Vogel-Mikuš, K., Jeromel, L., Vavpetič, P., Pelicon, P., Kaulich, B., Gianoncelli, A., Eichert, D., Regvar, M., & Kreft, I. (2013). Spatially resolved distributions of the mineral elements in the grain of tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*). *Food Research International*, 54(1), 125-131. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.06.020>
- Prasad, P. V. V., Staggenborg, S. A., & Ristic, Z. (2008). Impacts of Drought and/or Heat Stress on Physiological, Developmental, Growth, and Yield Processes of Crop Plants. *Response of Crops to Limited Water*, 301-355. <https://doi.org/10.2134/advagricsystmodell.c11>
- Qaderi, M. M., Kurepin, L. V., & Reid, D. M. (2012). Effects of temperature and watering regime on growth, gas exchange and abscisic acid content of canola (*Brassica napus*) seedlings. *Environmental and Experimental Botany*, 75, 107-113. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.09.003>
- Qin, P., Wang, Q., Shan, F., Hou, Z., & Ren, G. (2010). Nutritional composition and flavonoids content of flour from different buckwheat cultivars. *International Journal of Food Science & Technology*, 45(5), 951-958. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02231.x>
- Quinet, M., Cawoy, V., Lefèvre, 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). *Journal of Experimental Botany*, 55(402), 1509-1517.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erh164>
- Radovic, R. S., Maksimovic, R. V., Brkljacic, M. J., Varkonji Gasic, I. E., & Savic, P. A. (1999). 2S Albumin from Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) Seeds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(4), 1467-1470. <https://doi.org/10.1021/jf980778s>
- Ratan, P., & Kothiyal, P. (2011). *Fagopyrum esculentum* Moench (common buckwheat) edible plant of Himalayas : A Review.
- Repo-Carrasco-Valencia, R., Hellström, J., Pihlava, J.-M., & Mattila, P. (2010). Flavonoids and other phenolic compounds in Andean indigenous grains : Quinoa (*Chenopodium quinoa*), ka??iwa (*Chenopodium pallidicaule*) and kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Food Chemistry*, 120, 128-133. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.09.087>
- Rodríguez, J. P., Rahman, H., Thushar, S., & Singh, R. K. (2020). Healthy and Resilient Cereals and Pseudo-Cereals for Marginal Agriculture : Molecular Advances for Improving Nutrient Bioavailability. *Frontiers in Genetics*, 11. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.00049>
- Sadiq, I. I. S., Siddiqui, K. A., Arain, C. R., & Azmi, A. R. (1994). Wheat Breeding in a Water-stressed Environment. I. Delineation of Drought Tolerance and Susceptibility. *Plant Breeding*, 113(1), 36-46. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.1994.tb00699.x>
- Salah, H., & Tardieu, F. (1997). Control of Leaf Expansion Rate of Droughted Maize Plants under Fluctuating Evaporative Demand (A Superposition of Hydraulic and Chemical Messages?). *Plant Physiology*, 114(3), 893-900. <https://doi.org/10.1104/pp.114.3.893>
- Salvucci, M. E., & Crafts-Brandner, S. J. (2004). Relationship between the Heat Tolerance of Photosynthesis and the Thermal Stability of Rubisco Activase in Plants from Contrasting Thermal Environments. *Plant Physiology*, 134(4), 1460-1470. <https://doi.org/10.1104/pp.103.038323>
- Saulnier, L. (2012). Les grains de céréales : Diversité et compositions nutritionnelles. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 47(1, Supplement 1), S4-S15. [https://doi.org/10.1016/S0007-9960\(12\)70292-4](https://doi.org/10.1016/S0007-9960(12)70292-4)

- Schilperoord, P. (2017). *Plantes cultivées en Suisse—Le sarrasin*.
<https://doi.org/10.22014/97839524176-e8>
- Shukla, A., Srivastava, N., Suneja, P., Yadav, S. K., Hussain, Z., Rana, J. C., & Yadav, S. (2018). Genetic diversity analysis in Buckwheat germplasm for nutritional traits. *IJEB Vol.56(11) [November 2018]*. <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/45342>
- Sinkovič, L., Kokalj, D., Vidrih, R., & Meglič, V. (2020). Milling fractions fatty acid composition of common (*Fagopyrum esculentum* Moench) and tartary (*Fagopyrum tataricum* (L.) Gaertn) buckwheat. *Journal of Stored Products Research*, 85, 101551.
<https://doi.org/10.1016/j.jspr.2019.101551>
- Slawinska, J., & Obendorf, R. L. (2001). Buckwheat seed set in planta and during in vitro inflorescence culture : Evaluation of temperature and water deficit stress. *Seed Science Research*, 11(3), 223-233. <https://doi.org/10.1079/SSR200178>
- Small, E. (2017). 54. Buckwheat – the world’s most biodiversity-friendly crop? *Biodiversity*, 18(2-3), 108-123. <https://doi.org/10.1080/14888386.2017.1332529>
- Sobhani, M. R., Rahmikhoev, G., Mazaheri, D., & Majidian, M. (2014). Influence of different sowing date and planting pattern and N rate on buckwheat yield and its quality. *Australian Journal of Crop Science*, 8, 1402-1414.
- Steadman, K. J., Burgoon, M. S., Lewis, B. A., Edwardson, S. E., & Obendorf, R. L. (2001). Buckwheat Seed Milling Fractions : Description, Macronutrient Composition and Dietary Fibre. *Journal of Cereal Science*, 33(3), 271-278. <https://doi.org/10.1006/jcres.2001.0366>
- Stone, P. J., & Wilson, P. R. (2012). *Drought effects on canopy development in sweet corn 1*.
<http://www.regional.org.au/au/asa/1998/4/262stone.htm>
- Sugimoto, H., & Sato, T. (2000). Effects of Excessive Soil Moisture at Different Growth Stages on Seed Yield of Summer Buckwheat. *Japanese journal of crop science*, 69(2), 189-193.
<https://doi.org/10.1626/jcs.69.189>
- Sujak, A., Kotlarz, A., & Strobel, W. (2006). Compositional and nutritional evaluation of several lupin seeds. *Food Chemistry*, 98, 711-719. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.06.036>

- Suvorova, G., & Zhou, M. (2018). Distribution of Cultivated Buckwheat Resources in the World. In M. Zhou, I. Kreft, G. Suvorova, Y. Tang, & S. H. Woo (Éds.), *Buckwheat Germplasm in the World* (p. 21-35). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811006-5.00003-3>
- Sytar, O., Biel, W., Smetanska, I., & Brestic, M. (2018). Bioactive Compounds and Their Biofunctional Properties of Different Buckwheat Germplasms for Food Processing. In M. Zhou, I. Kreft, G. Suvorova, Y. Tang, & S. H. Woo (Éds.), *Buckwheat Germplasm in the World* (p. 191-204). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811006-5.00019-7>
- Sytar, O., Brestic, M., Zivcak, M., & Tran, L.-S. P. (2016). The Contribution of Buckwheat Genetic Resources to Health and Dietary Diversity. *Current Genomics*, 17(3), 193-206. <https://doi.org/10.2174/1389202917666160202215425>
- Tahir, I., & Farooq, S. (1985). Grain composition in some buckwheat cultivars (*Fagopyrum* Spp.) with particular reference to protein fractions. *Plant Foods for Human Nutrition*, 35(2), 153-158. <https://doi.org/10.1007/BF01092131>
- Tardieu, F. (2005). Plant tolerance to water deficit: Physical limits and possibilities for progress. *Comptes Rendus Geoscience*, 337(1), 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2004.09.015>
- Verhoeven, J. W. (1996). Glossary of terms used in photochemistry (IUPAC Recommendations 1996). *Pure and Applied Chemistry*, 68(12), 2223-2286. <https://doi.org/10.1351/pac199668122223>
- Wang, J., Chatzidimitriou, E., Wood, L., Hasanalieva, G., Markellou, E., Iversen, P. O., Seal, C., Baranski, M., Vigar, V., Ernst, L., Willson, A., Thapa, M., Barkla, B. J., Leifert, C., & Rempelos, L. (2020). Effect of wheat species (*Triticum aestivum* vs *T. spelta*), farming system (organic vs conventional) and flour type (wholegrain vs white) on composition of wheat flour – Results of a retail survey in the UK and Germany – 2. Antioxidant activity, and phenolic and mineral content. *Food Chemistry: X*, 6, 100091. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2020.100091>
- Wijngaard, H. H., & Arendt, E. K. (2006). Optimisation of a Mashing Program for 100% Malted Buckwheat. *Journal of the Institute of Brewing*, 112(1), 57-65. <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2006.tb00708.x>
- Williams, T. (1995). *Cereals and pseudocereals*. Chapman & Hall.

- 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*). *Journal of Food, Agriculture and Environment*, *11*, 1358-1363.
- Yang, Y., Timlin, D. J., Fleisher, D. H., Kim, S.-H., Quebedeaux, B., & Reddy, V. R. (2009). Simulating leaf area of corn plants at contrasting water status. *Agricultural and Forest Meteorology*, *149*(6-7), 1161-1167. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.02.005>
- Zhang, L., Liang, Z., He, X., Meng, Q., Hu, Y., Schmidhalter, U., Zhang, W., Zou, C., & Chen, X. (2020). Improving grain yield and protein concentration of maize (*Zea mays* L.) simultaneously by appropriate hybrid selection and nitrogen management. *Field Crops Research*, *249*, 107754. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107754>
- Zhang, Q., & Xu, J.-G. (2017). Determining the geographical origin of common buckwheat from China by multivariate analysis based on mineral elements, amino acids and vitamins. *Scientific Reports*, *7*(1), 9696. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08808-y>
- Zhang, Z.-L., Zhou, M., Tang, Y., Li, F.-L., Tang, Y.-X., Shao, J.-R., Xue, W.-T., & Sun, Z.-M. (2012). Bioactive compounds in functional buckwheat food. *Food Research International*, *49*, 389–395. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.07.035>
- Zhou, M., Tang, Y., Deng, X., Ruan, C., Ding, M., Shao, J., Tang, Y., & Wu, Y. (January 1, 2018b). Description of Cultivated Common Buckwheat. In M. Zhou, I. Kreft, G. Suvorova, Y. Tang, & S. H. Woo (Éds.), *Buckwheat Germplasm in the World* (p. 53-60). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811006-5.00006-9>
- Zhou, M., Tang, Y., Deng, X., Ruan, C., Ding, M., Shao, J., Tang, Y., & Wu, Y. (2018). Description of Cultivated Tartary Buckwheat. In M. Zhou, I. Kreft, G. Suvorova, Y. Tang, & S. H. Woo (Éds.), *Buckwheat Germplasm in the World* (p. 45-52). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811006-5.00005-7>
- Zhou, X.-L., Yan, B.-B., Xiao, Y., Zhou, Y.-M., & Liu, T.-Y. (Sep 2018c). Tartary buckwheat protein prevented dyslipidemia in high-fat diet-fed mice associated with gut microbiota changes. *Food and Chemical Toxicology: An International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association*, *119*, 296-301. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.02.052>

- Zhou, Y., Zhao, S., Jiang, Y., Wei, Y., & Zhou, X. (2019). Regulatory Function of Buckwheat-Resistant Starch Supplementation on Lipid Profile and Gut Microbiota in Mice Fed with a High-Fat Diet. *Journal of Food Science*, 84(9), 2674-2681. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14747>
- Zhu, F. (2016). Chemical composition and health effects of Tartary buckwheat. *Food Chemistry*, 203, 231-245. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.02.050>

Comparaison des qualités nutritionnelles du sarrasin commun (*Fagopyrum esculentum*) et de Tartarie (*Fagopyrum tataricum*) et impact des changements climatiques sur la croissance et la production du sarrasin de Tartarie (*Fagopyrum tataricum*).

Présenté par : Sia Christiane Lynn F.

Résumé

C'est une évidence irréfutable que le climat change, cela affecte la santé humaine et son impact sur l'agriculture n'est pas négligeable car elle modifie le cycle de vie des plantes. L'objectif de ce travail est primo, de comparer les qualités nutritionnelles du sarrasin commun (*Fagopyrum esculentum*) et de Tartarie (*Fagopyrum tataricum*), et secundo d'étudier les effets des changements climatiques, plus précisément les effets d'un stress thermique et hydrique, sur la croissance et la reproduction de deux variétés du sarrasin de Tartarie (*Fagopyrum tataricum* var. Zlata et Izlek). Le premier volet de ce mémoire a porté sur la comparaison des qualités nutritionnelles des graines du sarrasin commun (var. la Harpe et Darja) et de Tartarie (var. Izlek et Zlata). Les graines analysées provenaient d'un essai fait en champ en été 2019. Après les dosages biochimiques des protéines, acides aminés et minéraux des graines des 4 variétés, il a été constaté une teneur plus élevée en K (var. la Harpe-Darja : 5.64-4.47mg/g ; var. Izlek- Zlata : 4.54-4.44mg/g) et Mg (var. la Harpe – Darja : 1.77-1.60 mg/g ; var Izlek- Zlata : 1.49-1.29 mg/g) chez les 2 espèces par rapport aux teneurs en Cu, Fe et Zn avec une teneur en Mg supérieur chez l'espèce *F. esculentum*. Les teneurs en protéines observées étaient également plus importantes chez *F. esculentum* (var. la Harpe-Darja : 0.176-0.152 g/g) par rapport aux teneurs chez *F. tataricum* (var Izlek- Zlata : 0.129-0.122g/g). Les teneurs en acides aminés étaient aussi similaires entre espèces excepté la teneur en proline qui était plus élevée chez *F. tataricum* (var. Harpe-Darja : 1.73-2.33 mg /g; var. Izlek - Darja : 1.933-2.4 mg/g). La deuxième expérience a été réalisée en serre sur une période de trois mois. Les plantes des 2 variétés ont été soumises à deux températures, 21° et 29°C et ce, sous deux conditions d'arrosage : arrosage normal et stress hydrique. Dans l'expérience réalisée en serre à 21° C, le principal effet observé sous les deux conditions de manière générale, fut quantitativement semblable. Les plantes Zlata et Izlek en état de stress hydrique ont produit approximativement un même nombre de feuilles et d'inflorescences que celles en condition contrôlée. Cependant, chez les plantes stressées ces inflorescences présentaient un nombre réduit de fleurs. A 29°C, la variété Zlata a produit plus de feuilles et d'inflorescences qu'à 21°C et durant toute l'expérience a été impactée par l'effet du stress hydrique contrairement à la variété Izlek qui fut plus impactée par la température que par le stress thermique. Face donc au stress thermique, les variétés ont augmenté leur taux de transpiration et leur conductance stomatique, le stress hydrique quant à lui a réduit la conductance stomatique pour éviter d'importante perte en eau. La température et le stress ont entraîné une réduction de la surface foliaire chez les 2 espèces. Celles soumises au stress combiné, ont connu une croissance végétative et une phase de reproduction au ralenti. Certes la variété Izlek n'a pas été impacté par les stress hydrique à 21°C comme la variété Zlata mais elle s'est montrée moins résistante que la variété Zlata, surtout à haute température et elle a produit moins de feuilles, moins d'inflorescences et moins de graines.

Mots clés : *F. esculentum*, *F. tataricum*, stress thermique, stress hydrique , Izlek, Zlata, La Harpe, Darja

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Faculté des bioingénieurs

Croix du Sud, 2 bte L7.05.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/agro