

Impact d'une hausse de température et d'un déficit hydrique  
sur la croissance, la reproduction et la qualité des graines  
du sarrasin de Tartarie (*Fagopyrum tataricum*)  
dans le contexte des changements climatiques

VERGEADE Marie-Floriane

Mémoire présenté en vue de  
l'obtention du diplôme de Master  
en Biologie des Organismes et  
Ecologie

Promotrice: Muriel Quinet (Earth and Life Institute,  
Laboratoire GRPV)

Année  
académique  
2022-2023



## Remerciements

Tout d'abord, je remercie beaucoup Mme Quinet pour son accueil en tant que mémorante dans son laboratoire. Elle a été bienveillante, disponible et m'a encadrée efficacement en me laissant autonome et malgré toutes les autres personnes à sa charge.

Je tiens aussi à remercier Brigitte et Paul pour leur précieuse aide dans toutes les expériences et manipulations, leur bienveillance, leur compréhension et leur disponibilité. Je remercie également tous ceux qui contribuent de près ou de loin à la bonne ambiance du laboratoire GRPV.

Merci à mes co-mémorants Anthony, Corentin, Mathilde et aussi Ophélie pour leur entraide ou nos échanges sympathiques.

Merci à Monsieur Migon pour m'avoir fourni toutes les informations concernant les serres.

Merci à Guillaume Jacquemin, André Lejeune et Guillaume Lobet d'avoir accepté de faire partie de mon jury de mémoire.

Enfin, je remercie mes parents pour leur assistance technique lors de la récolte et leur soutien sans faille tout au long de mes études, sans oublier mon lapin Shifu pour sa présence affectueuse.

# Table des matières

|      |                                                                        |    |
|------|------------------------------------------------------------------------|----|
| I-   | INTRODUCTION .....                                                     | 1  |
| 1.   | CHANGEMENTS CLIMATIQUES .....                                          | 1  |
| 1.1  | Gaz à effet de serre .....                                             | 1  |
| 1.2  | Températures .....                                                     | 2  |
| 1.3  | Précipitations versus Sécheresses .....                                | 4  |
| 1.4  | Conditions météorologiques extrêmes .....                              | 5  |
| 2.   | PROBLEMES DANS LES CULTURES .....                                      | 6  |
| 3.   | STRESS HYDRIQUE ET THERMIQUE .....                                     | 7  |
| 3.1  | Germination.....                                                       | 8  |
| 3.2  | Croissance végétative.....                                             | 8  |
| 3.3  | Reproduction.....                                                      | 9  |
| 4.   | SARRASIN .....                                                         | 11 |
| 4.1  | Description.....                                                       | 11 |
| 4.2  | Origine et historique .....                                            | 13 |
| 4.3  | Biologie et culture du sarrasin.....                                   | 15 |
| 4.4  | Propriétés .....                                                       | 18 |
| 4.5  | Utilisation .....                                                      | 20 |
| 5.   | OBJECTIFS ET HYPOTHESES DU MEMOIRE .....                               | 21 |
| II-  | MATERIELS ET METHODES .....                                            | 22 |
| 1.   | MATERIEL VEGETAL .....                                                 | 22 |
| 2.   | CULTURE ET APPLICATION DES STRESS .....                                | 22 |
| 3.   | SUIVIS MORPHOLOGIQUES .....                                            | 24 |
| 3.1  | Dans le temps.....                                                     | 24 |
| 3.2  | Ponctuels .....                                                        | 24 |
| 4.   | POIDS FRAIS ET SEC .....                                               | 24 |
| 5.   | MESURES PHYSIOLOGIQUES .....                                           | 25 |
| 5.1  | PNA .....                                                              | 25 |
| 5.2  | Fluorimètre.....                                                       | 25 |
| 5.3  | Poromètre.....                                                         | 26 |
| 5.4  | Osmomètre.....                                                         | 26 |
| 6.   | MESURES BIOCHIMIQUES .....                                             | 27 |
| 6.1  | MDA.....                                                               | 27 |
| 6.2  | Polyphénols et flavonoïdes .....                                       | 27 |
| 7.   | RECOLTE ET QUALITE DES GRAINES .....                                   | 29 |
| 7.1  | Poids de 1000 grains .....                                             | 29 |
| 7.2  | Minéralisations .....                                                  | 29 |
| 8.   | ANALYSES STATISTIQUES .....                                            | 30 |
| III- | RESULTATS .....                                                        | 31 |
| 1.   | CROISSANCE .....                                                       | 31 |
| 1.1  | Taille .....                                                           | 31 |
| 1.2  | Nombre de feuilles .....                                               | 32 |
| 1.3  | Nombre d'inflorescences .....                                          | 33 |
| 1.4  | Ramifications .....                                                    | 34 |
| 2.   | POIDS SEC ET TENEUR EN EAU .....                                       | 36 |
| 3.   | PARAMETRES PHYSIOLOGIQUES .....                                        | 37 |
| 3.1  | PNA .....                                                              | 38 |
| 3.2  | Conductance stomatique et phase photochimique de la photosynthèse..... | 39 |
| 3.3  | Potentiel osmotique.....                                               | 40 |
| 3.4  | MDA.....                                                               | 41 |

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4. GRAINES .....                                                              | 42 |
| 4.1 Nombre de graines .....                                                   | 42 |
| 4.2 Poids de 1000 grains.....                                                 | 43 |
| 4.3 Minéraux .....                                                            | 44 |
| 5. POLYPHENOLS ET FLAVONOÏDES .....                                           | 45 |
| IV- DISCUSSION .....                                                          | 46 |
| 1. DIFFERENCE DE CROISSANCE ENTRE LES 2 VARIETES .....                        | 46 |
| 2. EFFET DES STRESS THERMIQUE ET HYDRIQUE SUR LA CROISSANCE .....             | 46 |
| 3. EFFET DES STRESS THERMIQUE ET HYDRIQUE SUR LA PHYSIOLOGIE .....            | 50 |
| 4. EFFET DES STRESS THERMIQUE ET HYDRIQUE SUR LA PRODUCTION DES GRAINES ..... | 54 |
| V- CONCLUSION .....                                                           | 57 |
| VI- PERSPECTIVES .....                                                        | 58 |
| BIBLIOGRAPHIE .....                                                           | 60 |
| ANNEXES .....                                                                 | 75 |

# I- Introduction

## 1. Changements climatiques

Le réchauffement du système climatique est sans équivoque la conséquence de l'activité humaine. Voici ce qu'affirment les scientifiques du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) dans le premier volet de leur sixième rapport d'évaluation publié en août 2021.

Plusieurs indicateurs climatiques ont ainsi été pris en compte et fournissent un état des lieux du climat actuel (IPCC, 2021).

### 1.1 Gaz à effet de serre

Tout d'abord, les gaz à effet de serre tels que le CO<sub>2</sub> atmosphérique, le méthane et l'oxyde nitreux, en association avec la vapeur d'eau emprisonnent la chaleur rayonnée de la Terre. Leur très nette augmentation, causée majoritairement par la déforestation et l'utilisation intensive de combustibles fossiles a entraîné le réchauffement climatique. Celui-ci aurait débuté voilà près de 2 siècles, c'est-à-dire à l'aube de la révolution industrielle en 1830 selon une récente étude publiée par une équipe de chercheurs internationaux (Abram *et al.*, 2016). Pour mémoire, des études antérieures l'estimaient plutôt au début du XX<sup>e</sup> siècle.

En 2020, le taux atmosphérique de CO<sub>2</sub> a atteint 413 ppm, soit 149% par rapport au niveau préindustriel en 1750 (Figure 1). Cette hausse inédite ne cessant de se poursuivre en 2021 et début 2022 est due aux activités humaines telles que les changements d'usage des sols, la production de ciment et la combustion de ressources fossiles (Mélia, 2022).

La concentration en méthane a également fortement augmenté s'élevant à 1889 ppb, soit une hausse de 262 % (Fig 1), principalement en raison des émissions liées à l'élevage, à la riziculture et aux décharges.

Le protoxyde d'azote se situe à un taux d'environ 333 ppb, 123% de plus que le niveau de 1750 (Fig 1), principalement du à la dégradation des engrais azotés. Ces trois gaz ont alors poursuivi leur progression et constituent le principal moteur des

changements climatiques depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle, si ce n'est encore plus ancien (Mélia, 2022).

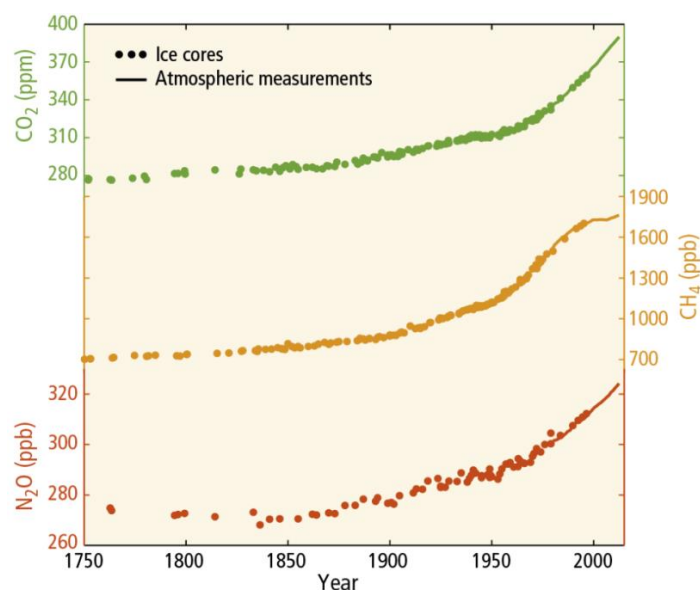


Figure 1 : Changements observés dans les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre : dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>, vert), méthane (CH<sub>4</sub>, orange) et protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O, rouge) (IPPC, 2014).

## 1.2 Températures

Concernant les températures, le réchauffement global constaté en moyenne dans le monde est estimé à environ 1,1°C depuis 1850 selon le 1<sup>er</sup> volume du 6<sup>e</sup> rapport du GIEC (Duvernoy, 2022). Le réchauffement moyen des continents (+ 1,6°C) était plus prononcé que celui des océans (+ 0,9°C) (Mélia, 2022).

Quatre trajectoires d'évolution de la concentration des gaz à effet de serre ont été établies et qualifiées de profils représentatifs d'évolution des concentrations ou RCP (pour Representative Concentration Pathways) par des climatologues du GIEC. Ils couvrent une large plage de forçage radiatif, définie comme un apport d'énergie accru au niveau de la surface en watts par mètre carré. Une évolution différente de ce forçage d'ici 2100 est représentée par chacun des 4 profils RCP. En parallèle, les sociologues et les économistes travaillent sur des scénarios présentant diverses caractéristiques de développements socio-économiques et diverses stratégies d'adaptation et d'atténuation. Un ensemble de base de cinq

familles de scénarios, nommés SSP (pour Shared Socioeconomic Pathways), a ainsi été défini (IPCC, 2021 ; Météo-France, 2020 ; ONERC Ministère de la Transition Écologique, 2013).

Quel que soit le scénario retenu, la température moyenne mondiale à la fin de ce siècle sera plus élevée que celle enregistrée aujourd'hui. Il est probable que le seuil de 1,5°C sera franchi au cours des vingt prochaines années. À l'horizon 2041-2060, le réchauffement devrait légèrement dépasser le seuil de 1,5°C même dans le scénario SSP1-1.9 qui repose sur de très fortes réductions des émissions, et pourrait atteindre près de 2,5°C dans le scénario à fortes émissions SSP5-8.5. En fin de siècle (2081-2100), le réchauffement mondial sera très probablement inférieur à 2°C si le scénario SSP1-1.9 est suivi, mais pourrait atteindre 4 à 5°C dans le cas du scénario SSP5-8.5 (Fig 2 ; Méliá, 2022).

Dans tous les cas, il existe une véritable nécessité de limiter l'augmentation de la température à 1,5°C d'ici 2100 comme le souligne l'accord de Paris de 2015. Un rapport de l'ONU sur les changements climatiques publié en 2018 met aussi un point d'honneur sur le fait que le monde ne peut pas se permettre une hausse de 2°C. Ainsi, les dernières chances de l'humanité pour éviter les multiples impacts du réchauffement climatique résident dans les dix prochaines années (Shivanna, 2020).

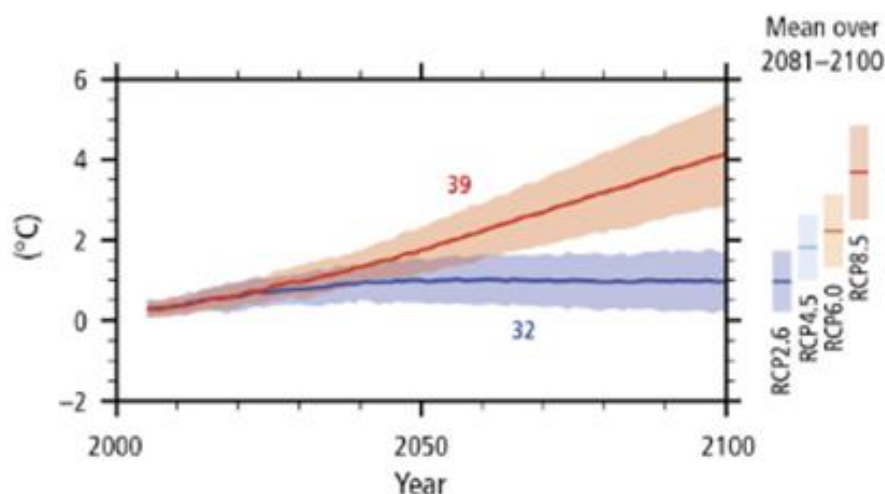


Figure 2 : Changement de la température de surface moyenne mondiale de 2005 à 2100 avec les 4 profils RCP (IPCC, 2014).

### 1.3 Précipitations versus Sécheresses

Conjointement, le cycle hydrologique mondial s'est intensifié, ce qui se traduit notamment par une augmentation depuis 1950 des précipitations en moyenne sur l'ensemble des continents, cette tendance se renforçant à partir des années 1980. Cela est bien vérifié en Europe. L'Europe occidentale a connu un récent épisode d'inondations à la mi-juillet 2021, comptant parmi les plus graves qu'elle ait jamais enregistrés. 100 à 150 millimètres de pluies sont en effet tombées sur une vaste zone de l'ouest de l'Allemagne et de l'est de la Belgique où le sol était déjà saturé, provoquant des inondations et des glissements de terrain qui ont coûté la vie à plus de 200 personnes (W.M.O., 2021).

Cela est en concordance avec l'une des constatations faites par les experts du GIEC. Une augmentation de la fréquence ou de l'intensité des fortes précipitations est prévue en Amérique du Nord et en Europe. Elle serait considérable en Europe du Nord. En conséquence, les crues des cours d'eau devraient augmenter dans la plupart des pays d'Europe ce qui renforcera alors les risques d'inondations.

Plus le réchauffement sera marqué, plus les hausses régionales de précipitations seront importantes. Celles-ci pourraient atteindre 20% avec 2°C de réchauffement voire 40% si on se projette dans le scénario à 4°C (IPCC, 2021 ; Méliá, 2020).

Contradictoirement, on observe une augmentation des sécheresses depuis 1950 à travers le monde (Dai, 2013). Les périodes de sécheresse sont plus intenses et plus fréquentes dans le bassin méditerranéen ainsi que dans les zones tropicales et intertropicales (IPCC, 2021). Additionnée à l'augmentation de l'évapotranspiration due aux températures plus chaudes, cela ne va qu'accroître la sécheresse des sols (Duvernoy, 2022).

Ce constat est en adéquation avec les modèles climatiques qui prédisent des sécheresses plus importantes et fréquentes, ce qui est mis en évidence dans le 6<sup>e</sup> rapport du GIEC (Wada *et al.*, 2013).

S'ajoute également à cela la consommation humaine d'eau. Celle-ci n'a fait qu'intensifier la fréquence des sécheresses mondiales de 27 % qui est la plus sévère en Asie (35 %), mais aussi importante en Amérique du Nord (25 %) et en Europe (20 %). L'irrigation est également responsable de l'intensification des sécheresses hydrologiques dans l'ouest et le centre des États-Unis, le sud de l'Europe et l'Asie.

Ainsi, une étude révèle que la consommation d'eau par les humains est l'un des mécanismes le plus important accentuant la sécheresse hydrologique. Il est fort probable qu'il reste un facteur majeur affectant l'intensité et la fréquence de la sécheresse dans les décennies à venir (IPCC, 2021; Van Ypersele *et al.*, 2021 ; Wada *et al.*, 2013 ).

#### 1.4 Conditions météorologiques extrêmes

Les phénomènes climatiques extrêmes comptent également parmi les impacts climatiques. En effet, beaucoup se sont produits ces dernières années comme les canicules en Australie ou les nombreuses tempêtes qui ont frappé diverses régions du globe.

Concernant les canicules, les experts du GIEC ont pu établir que l'ensemble des continents ne sera pas épargné par la fréquence accrue de ces chaleurs extrêmes. Sur la période 1850-1900, elles intervenaient en moyenne une fois par décennie. Elles surviennent trois fois plus actuellement et pourraient se manifester quatre fois plus d'ici 2100 sous le scénario de 1,5°C, voire tous les ans avec un réchauffement de 4°C.

Dans le 6<sup>e</sup> rapport du GIEC, il est estimé, avec un niveau de confiance élevé, que l'influence humaine contribue à l'augmentation de la fréquence et de la sévérité des phénomènes de chaleurs extrêmes dans la quasi-totalité des régions du globe (Duvernoy, 2022 ; Mélia, 2022).

Pour conclure sur les changements climatiques, on peut nettement distinguer qu'il y a une exacerbation des événements extrêmes et des impacts considérables. Les populations et les activités humaines sont ou seront dans un futur proche touchées tout comme les écosystèmes qui se dégradent à un rythme sans précédent.

Dans ce sens, l'agriculture constitue un sujet primordial à étudier puisque la sécurité alimentaire de la population humaine grandissante se voit fort altérée (Duvernoy, 2022 ; W.M.O., 2021). C'est ce que nous allons aborder dès à présent.

## 2. Problèmes dans les cultures

Puisque les différentes composantes des changements climatiques conduisent à des conséquences extrêmement variables, des effets tantôt positifs, tantôt négatifs peuvent s'ensuivre sur l'agriculture, en fonction des différentes cultures et des régions du monde (Seguin *et al.*, 2005).

Tout d'abord, la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>, doublant potentiellement à la fin du 21<sup>e</sup> siècle (IPCC, 2007), permettra de stimuler l'activité photosynthétique des plantes de l'ordre de 20% à 30% selon les estimations. Ainsi la production de biomasse se verra augmenter jusqu'à 20% pour certaines espèces (Seguin *et al.*, 2005; Abdelghani, 2015).

On s'attend alors globalement à une hausse de la productivité agricole d'environ 15% dans le Nord de l'Europe et plus largement dans les pays de hautes latitudes, accentuée également par l'augmentation des températures. Dans ces contrées, les cultures entre autres de blé, maïs et riz fourniront plus de rendements (Ahad *et al.*, 2015 ; Hart *et al.*, 2017 ; Mortier, 2020 ; Seguin *et al.*, 2005 ; Seguin, 2010).

Les changements climatiques agiront donc positivement sur l'agriculture en allongeant par ailleurs la saison de croissance ce qui augmentera les rendements des cultures, en accélérant la vitesse de maturation des plantes mais aussi en optimisant l'utilisation de leurs nutriments (Ahad *et al.*, 2015 ; Lavalley *et al.*, 2009 ; Rousseau *et al.*, 2007).

Ces bienfaits potentiels font inexorablement face à d'importantes répercussions négatives.

Les demandes en eau des plantes vont s'accroître, liées aux périodes de déficit hydrique de plus en plus importantes, ce qui engendrera alors un stress. Les rendements agricoles du Sud de l'Europe et plus généralement des pays de l'hémisphère austral se verront alors affecter avec une chute estimée à -50% ; en cause l'augmentation des épisodes de chaleurs extrêmes et des sécheresses, l'augmentation de la température mais aussi les émissions croissantes de gaz à effet de serre (Lavalley *et al.*, 2009 ; Hart *et al.*, 2017 ; Mortier, 2020 ; Seguin *et al.*, 2005 ; Seguin, 2010).

La chaleur occasionnera aussi un risque plus élevé de dommages directs sur les cultures (Ahad *et al.*, 2015). En raison d'une saison de croissance raccourcie, ces dernières subiront de surcroît les ravages du gel printanier tardif. Cette tendance sera observée localement dans les latitudes méridionales (Lavalley *et al.*, 2009).

Les insectes vont également jouer un rôle néfaste puisqu'on observera une infestation accrue par leurs populations et une introduction de nouvelles espèces favorisée par le

raccourcissement de la saison de croissance (Ahad *et al.*, 2015 ; Lavalley *et al.*, 2009 ; Rousseau *et al.*, 2007).

De même, la gamme de rongeurs et de maladies indigènes ou exotiques s'élargira (Lavalley *et al.*, 2009).

Les mauvaises herbes vont aussi envahir de plus belle les champs cultivés. Leur éradication ne se fera pas sans mal puisque les pesticides, communément employés et dont on aura de plus en plus besoin, perdront en efficacité à cause des changements climatiques projetés (Ahad *et al.*, 2015 ; Lavalley *et al.*, 2009 ; Rousseau *et al.*, 2007). Son action va en outre renforcer l'érosion du sol (Ahad *et al.*, 2015 ; Rousseau *et al.*, 2007).

Enfin, le réchauffement global aura un inconvénient pour la santé humaine de façon directe et indirecte. Les espèces cultivées vont en effet perdre en valeur nutritionnelle. Une étude sur diverses variétés de riz cultivées en Asie a montré que l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique engendrera l'amenuisement des protéines, du fer, du zinc et des vitamines B1, B2, B5 et B9 contenus dans les grains. Subséquemment, des carences nutritionnelles mondiales sont plausibles tant dans les pays en développement que développés chez 2 milliards de personnes. D'autres cultures céréalières pourront aussi être touchées (Shivanna, 2020).

### 3. Stress thermique et hydrique

Afin de comprendre comment tamponner les effets des changements climatiques sur l'agriculture, il est important d'appréhender ce qui endommage les plantes en cas de stress thermique et hydrique.

Un stress thermique se définit comme une élévation de la température pendant une période de temps suffisamment longue et au-delà d'un seuil critique pour causer des dommages irréversibles et limiter fortement la croissance et le rendement des plantes cultivées (Wahid, 2007).

Un stress hydrique est subi par une plante lorsque sa transpiration d'eau sera supérieure à son absorption. La sécheresse est la cause principale de ce stress mais une salinité excessive, une toxicité ou encore un stress oxydatif peuvent aussi le déclencher (Herrero *et al.*, 2019 ; Loveland, 2011).

Les stress thermique et hydrique induisent une altération des processus morphologiques, physiologiques et biochimiques. Bien que celle-ci puisse varier selon l'espèce et le génotype, l'âge et le stade de développement, l'intensité et la durée du stress, une synthèse des impacts

majeurs produits est réalisable (Prasad *et al.*, 2018). On va ici distinguer les phases germinative, végétative et reproductive.

### 3.1 Germination

Tout d'abord, la germination, comme la dormance des graines, peuvent être contrôlées par la température. Chez certaines espèces végétales des régions tempérées, la dormance de leurs graines doit obligatoirement être rompue par une haute température, s'avérant alors vitale (Vandelook & Van Assche, 2008).

Beaucoup d'études ont été réalisées au sujet de l'impact d'une température élevée sur le pourcentage de germination. Elles révèlent une réduction, une forte entrave de celle-ci voire même son inhibition par exemple chez *Arabidopsis* (Toh *et al.*, 2008).

L'émergence des plantes, la vigueur des semis ainsi que la croissance des racicules et des plumules sont aussi négativement affectées par des fortes températures (Johkan *et al.*, 2011 ; Kumar *et al.*, 2011 ; Piramila *et al.*, 2012).

Le stress hydrique va similairement réduire le potentiel de germination et induire une croissance précoce des semis chez bon nombre de grandes cultures telles que le riz (*Oryza sativa* L.) (Manikavelu *et al.*, 2006 ; Okcu *et al.*, 2005; Zeid & Shedeed, 2006).

### 3.2 Croissance végétative

Un stress thermique élevé va impliquer un retard de croissance, des schémas de croissance et des événements phénologiques anormaux, une réduction des cycles de croissance et de développement. Le cycle de vie est écourté et la productivité amoindrie puisque la photosynthèse et la respiration sont touchées (Barnabás *et al.*, 2008 ; Ouzounidou *et al.*, 2012).

En ce qui concerne les racines, leur nombre va décliner, leur masse décroître et leur croissance sera plus faible. Les parties aériennes de la plante ne recevront alors qu'un apport limité d'eau et de nutriments.

Quant aux fruits et feuilles, leur développement sera freiné. Des symptômes de la chaleur seront enfin visibles semblables à des brûlures des rameaux, des feuilles, des branches et tiges ainsi que des coups de soleil, une sénescence et abscission des feuilles, une décoloration des

fruits et des feuilles et leurs dommages (Ismail & Hall, 1999 ; Mitra & Bhatia, 2008 ; Vollenweider & Günthardt-Goerg, 2005 ; Wahid *et al.*, 2007).

Le stress hydrique réduit le poids sec des racines et des pousses, la longueur de l'hypocotyle et la croissance végétative chez de nombreuses cultures essentielles.

Les feuilles vont être moins nombreuses, plus petites et vont être limitées en expansion par une pression de turgescence réduite et un taux lent de photosynthèse. Leurs poids frais et sec sont aussi sévèrement réduits. La conductance stomatique est le facteur le plus affecté par l'exposition à une faible teneur en eau dans le sol. La réponse initiale de la plante va d'ailleurs être de fermer les stomates afin d'éviter la perte d'eau par transpiration. Le taux de cette dernière comme le potentiel hydrique sont évidemment très faibles. De surcroît, le CO<sub>2</sub> sera moins disponible du fait de la fermeture des stomates ce qui sensibilisera plus la plante aux photodommages (Lawlor & Cornic, 2002).

Le retard de croissance évoqué plus haut provient de l'altération des relations nutritionnelles des plantes. Les racines absorbant avec l'eau des nutriments essentiels comme l'azote ou le calcium, elles ne pourront alors correctement les distribuer aux autres organes de la plante puisque leur mouvement sera irrégulier à cause du manque d'eau (Barber, 1995).

Combinés, les stress altèrent l'activité photosynthétique. Ce phénomène physiologique primordial (Farooq *et al.*, 2009) subit, en raison de la limitation de l'expansion des feuilles et de leur sénescence, un dysfonctionnement de ses mécanismes (Wahid *et al.*, 2007).

Cet aspect est concomitant d'une respiration et d'une température élevées sur les feuilles (Mittler, 2006). Le début et la durée des phases de développement sont également modifiés.

La croissance des tiges et la hauteur des plantes sont de surcroît réduites.

Les effets en simultané, plutôt que séparés produisent enfin un impact plus élevé sur la croissance et la productivité des cultures. (Craufurd *et al.*, 1993 ; Savin & Nicolas, 1996).

### 3.3 Reproduction

La sensibilité aux stress, principalement au stress thermique, est jugée la plus forte pour le stade de reproduction parmi tous les autres stades de la plante. L'initiation des boutons floraux est très vulnérable aux hautes températures, tout comme l'ensemble de la floraison chez les légumes et les céréales, induisant une diminution de la nouaison (nombre de fleurs qui deviennent des fruits) (Hedhly, 2009 ; Nava *et al.*, 2009 ; Saha *et al.*, 2010).

Le stress hydrique va réduire le potentiel de stockage des ressources énergétiques. L'avortement des ovules, l'échec de la fécondation, l'inhibition du développement du pollen, sa stérilité sont tous des impacts potentiels provoqués par les stress hydrique ou thermique (Barnabás *et al.*, 2008 ; Prasad *et al.*, 2008).

Vient enfin l'émergence des graines. Le stress thermique va diminuer le poids et le nombre total de graines. Le poids de mille grains (qui donne des indications sur le mode d'élaboration du rendement et des problèmes que la plante a pu rencontrer pendant son développement (échaudage, attaques par les insectes ou par les maladies)) est évidemment réduit (Ben Mariem *et al.*, 2021).

Le rendement des cultures fait en ce sens face à des réductions significatives qui ont pu être observées sur nombre de cultures comme l'orge, la moutarde ou encore le pois chiche (Cao *et al.*, 2008 ; Edreira & Otegui, 2012 ; Kalra *et al.*, 2008 ; Maheswari *et al.*, 2012 ; Prasad *et al.*, 2008 ; Warland *et al.*, 2006).

Le stress hydrique, pour sa part, réduit le nombre de graines et augmente la durée entre la formation des graines et la croissance complète des graines (Prasad *et al.*, 2008).

Les graines se remplissent grâce à un processus contrôlé essentiellement par 4 enzymes dont l'activité diminue en cas de sécheresse. Les cultures verront inéluctablement leur rendement dégradé (Ahmadi & Baker, 2001 ; Taiz *et al.*, 2006).

L'alliance sécheresse et chaleur provoque un raccourcissement de la durée de développement des épis (période déterminante du nombre potentiel de graines) et de la durée de remplissage des graines. La taille des graines va être négativement influencée suite à la diminution de la photosynthèse disponible pour leur développement. La composition des graines et la viabilité de celles récoltées vont également être réduites (Cohen *et al.*, 2021 ; Prasad *et al.*, 2008).

L'indice de récolte (rapport entre le rendement commercialisable d'une plante cultivée et la quantité totale de biomasse qui a été produite) sera enfin réduit par cette impitoyable combinaison (Cohen *et al.*, 2021 ; Munns *et al.*, 2014).

Pour conclure, les plantes peuvent aussi subir des dommages oxydatifs, soulignés comme stade ultérieur de ces stress.

Des ROS (espèces chimiques réactives de l'oxygène), comme le peroxyde d'hydrogène, sont susceptibles de se former suite à l'exposition des plantes à la sécheresse mais également

parfois à une haute température. Ils menacent sérieusement le fonctionnement des cellules en endommageant les lipides et les protéines (Liu & Huang, 2000; Wahid *et al.*, 2007).

#### 4. Sarrasin

Toutes les altérations citées précédemment engendrent des pertes économiques considérables pour le secteur agricole mondial. La sécurité et la stabilité alimentaires sont ainsi éminemment menacées d'un côté par le scénario climatique et de l'autre par la dépendance vis-à-vis d'un nombre limité de cultures (Farooq *et al.*, 2016 ; Pirzadah & Rehman, 2021 ; Singh *et al.*, 2020).

Selon la FAO, 80% de l'énergie alimentaire n'est fourni que par 12 espèces végétales. Parmi celles-ci, le riz, le blé, le maïs et la pomme de terre pourvoient aux besoins en protéines et calories à hauteur de 60% (F.A.O., 2005 ; Farooq *et al.*, 2016 ; Pirzadah & Rehman, 2021). Avec une population humaine en constante augmentation (~9 milliards d'ici 2050), il convient par conséquent de trouver des solutions durables de toute urgence (Farooq *et al.*, 2016 ; Pirzadah & Rehman, 2021 ; Singh *et al.*, 2020).

Les cultures alternatives, négligées depuis l'avènement de la mondialisation et de l'industrialisation, offrent dans un premier temps un bon potentiel quant à la gestion efficace de la production avec une utilisation minimale des terres et des intrants.

Secondement, elles sont résistantes à un panel de stress biotiques et abiotiques et pourraient à l'avenir atténuer les effets des changements climatiques (Mabhaudhi *et al.*, 2019 ; Massawe *et al.*, 2015). On peut citer le millet, faible émetteur de gaz à effet de serre, ou le sarrasin (Wang *et al.*, 2018), qui est l'objet de ce mémoire. Ayant un profil nutritionnel élevé et ne contenant pas de gluten, ce super aliment possède des propriétés nutraceutique et pharmaceutique grâce à un vaste échantillon de composés bioactifs (Pirzadah & Rehman, 2021 ; Singh *et al.*, 2020).

##### 4.1 Description

Le sarrasin est une plante dicotylédone de la famille des Polygonacées dans laquelle on retrouve notamment la patience ou la rhubarbe. Il s'agit d'une pseudo-céréale, puisque la fonction et la composition de ses graines sont similaires à celle des céréales, qui sont à l'opposé des monocotylédones.

Elle appartient au genre *Fagopyrum* regroupant à ce jour 21 espèces signalées (Ahmed *et al.*, 2014 ; Alvarez *et al.*, 2010 ; Kumari & Chaudhary, 2020; Singh *et al.*, 2020 ; Zhang *et al.*, 2021 ; Zhu, 2016).

Parmi ces dernières, le sarrasin commun (*F. esculentum* Moench) et le sarrasin de Tartarie (*F. tataricum* (L.) Gaertn.) sont cultivées (Cai *et al.*, 2004 ; Luthar *et al.*, 2021 ; Singh *et al.*, 2020). Nous allons tout d'abord les décrire, puis parler de leur origine et historique, leur biologie et production, évoquer ensuite leur utilisation pour finir par leurs propriétés tant pour la santé que pour la biodiversité.

Il s'agit d'une plante herbacée annuelle avec un cycle de vie court qui atteint 1 mètre de hauteur en général (Baniya *et al.*, 2001 ; Campbell, 1997 ; Joshi, 2008 ; Zhang *et al.*, 2017).

Plusieurs caractéristiques séparent le sarrasin commun du sarrasin de Tartarie.

Le sarrasin commun est une plante ramifiée et glabre. Les feuilles sont pétiolées, les limbes sont ovales-triangulaires à triangulaires, de 2 à 8 centimètres de long.

Les inflorescences sont terminales et auxiliaires, ramifiées en racèmes de cymes. Les fleurs sont blanches ou roses, de 6 millimètres de diamètre ; les pédicelles de 2-3 millimètres de long sont articulés; les périanthes persistants mesurent 3 millimètres de long. Il y a 8 nectaires jaunes, alternant avec des étamines hétérostylées et les stigmates sont capités. L'hétérostylie est défini comme un polymorphisme génétiquement déterminé dans lequel les anthères et les stigmates sont situés à différentes hauteurs dans leurs fleurs. Ceci est fréquemment associé à un système d'auto-incompatibilité. L'akène est triquetreux, à angle aigu, plus long que 5 millimètres, de couleur brune (Ahmed *et al.*, 2014 ; Barrett & Cruzan, 1994 ; Campbell, 1997 ; Lloyd & Webb, 1992 ; Quinet *et al.*, 2004).

Quant au sarrasin de Tartarie, il s'agit d'une plante ramifiée ou non, à tige striée, toujours avec des papilles sur les rameaux. Les feuilles, plus en forme de flèche sont pétiolées, la plupart des limbes sont triangulaires de longueur et largeur égales à 2 à 8 centimètres (Fig 3). Les inflorescences sont des racèmes de cymes. Les fleurs sont jaune-vert, de 2,5 millimètres de diamètre, les pédicelles sont non particuliers ; les périanthes mesurent 2 millimètres de long. Il y a 8 nectaires jaunes, alternant avec des étamines homostylées et les stigmates sont capités. L'homostylie s'explique par des hauteurs équivalentes des anthères et des stigmates dans les fleurs, conduisant à une auto-compatibilité chez les plantes (Barret & Shore, 2008). L'akène triquetreux brun mesure environ 5 millimètres de long, avec trois sillons profonds et les angles sont arrondis, sauf à l'extrémité.

Un grand nombre de cultivars ou de variétés locales existent chez les 2 espèces.

Comportant quatre surface triangulaires, leurs akènes peuvent présenter des tailles et formes différentes (Ahmed *et al.*, 2014 ; Campbell, 1997 ; Quinet *et al.*, 2004).



Figure 3 : *Fagopyrum tataricum* (Flora batava by Jan Kops, Herman Christiaan van Hall and others. Amsterdam, J.C. Sepp, 1844, volume 8 (plate 598).

#### 4.2 Origine et historique

Le sarrasin commun serait originaire d'Asie, plus particulièrement de l'Himalaya et du sud-ouest de la Chine, se situant à une altitude entre 300 et 2000 mètres. (Gondola & Papp, 2010 ; Huaixiang, 2007). Sa domestication daterait de plus de 2000 ans (Li & Yang, 1992). Cependant, d'autres scientifiques affirment grâce à des preuves archéologiques qu'il aurait été cultivé au Japon il y a plus de 6000 ans, soit durant la préhistoire (Tsukada *et al.*, 1986).

La région chinoise de Yunnan a été largement approuvée comme site important de domestication du sarrasin commun (Ohnishi, 2004 ; Qing-Fu, 2001).

Concernant le sarrasin de Tartarie, il proviendrait primitivement de la région himalayenne, et plus précisément de l'est du Tibet (Tsuji & Ohnishi, 2001), même si d'autres hypothèses ont été émises sur l'aire de répartition vers l'ouest voire le Sud-Ouest de la Chine.

Il pousse de 2000 mètres jusqu'à 4500 mètres d'altitude. On estime qu'il est cultivé depuis au moins 4000 ans (Luitel *et al.*, 2017 ; Whang, 1989 ; Zhang *et al.*, 2021).

La route de la soie a permis la diffusion du sarrasin commun en Europe (Ohnishi, 1993 ; Murai & Ohnishi, 1996). Des preuves archéologiques révèlent des traces initiales vers 1500 avant Jésus-Christ (Opperer, 1985). Ce n'est cependant qu'au début du Moyen-Âge que sa culture se répand et devient commune aux XIV<sup>e</sup> et XV<sup>e</sup> siècles. (Ohnishi, 1993 ; Gondola & Papp, 2010). Le sarrasin fut importé en Amérique dès le 17<sup>e</sup> siècle par les colons (Kreft, 2001).

Il rencontre un vif intérêt du XVII<sup>e</sup> au XIX<sup>e</sup> siècles en Occident. En France, sa culture parvient à son maximum de surface aux alentours de 1850 (Cawoy *et al.*, 2008 ; Ferault, 1984). Malheureusement, le XX<sup>e</sup> siècle et les nombreux progrès agricoles ont amené à sa disparition. Les engrais de plus en plus utilisés notamment ont ainsi propulsé le blé et d'autres céréales à succès au rang de cultures mondiales, au détriment du sarrasin (Cawoy *et al.*, 2008 ; Jacquemart *et al.*, 2012 ; Small, 2017). L'Asie et l'Europe de l'Est sont actuellement les principaux consommateurs de sarrasin, bien qu'il suscite un regain d'intérêt ces dernières années (Small, 2017).

Le sarrasin de Tartarie est quant à lui cultivé sur des terres marginales en montagnes dans l'ouest de la Chine et l'Himalaya, au Népal, au Japon, en Corée du Sud mais aussi au Canada et en Europe. Sur ce continent, la Russie et le Luxembourg en sont des cultivateurs tout comme les régions frontalières belges et allemandes. On en retrouve aussi en Italie, Slovénie et Suède. La Bosnie-Herzégovine cultive enfin le sarrasin de Tartarie traditionnellement et en culture mixte avec le sarrasin commun (Bonafaccia *et al.*, 2003a ; Bonafaccia *et al.*, 2003b ; Giupponi *et al.*, 2019 ; Kreft, 2020 ; Zewen, 2003 ; Zhang *et al.*, 2021).

### 4.3 Biologie et culture du sarrasin

Le sarrasin germe en 3 à 5 jours dans un sol idéalement chaud entre 24 et 26°C (Ahmed *et al.*, 2014 ; Babu *et al.*, 2018).

La pousse des plantes est rapide, des feuilles en forme de cœur ou de flèche selon les variétés sont produites. La période de croissance est courte puisqu'elle s'étend de 70 à 90 jours.

Cela dépend du jour de la plantation, du type de sol et des conditions environnementales qui vont aussi influencer sur la hauteur de la plante.

La floraison survient entre 30 et 45 jours après. Suite à la pollinisation d'une fleur, 10 jours sont nécessaires à l'embryon pour atteindre sa taille maximale et 1 à 2 semaines de plus pour que la graine soit à maturité (Ahmed *et al.*, 2014 ; Obendorf *et al.*, 1993).

La plante murît complètement entre 90 à 110 jours (Bjorkman *et al.*, 2008).

Il est ensuite intéressant d'analyser la composition du sarrasin et particulièrement ses graines. Sous diverses formes (coque, graine, feuille, fleur ou germe), le sarrasin contient de multiples composants bioactifs. On peut y trouver des protéines contenant des acides aminés essentiels, une quantité importante de flavonoïdes constitués par des polyphénols tels que la rutine, des polysaccharides, des fibres alimentaires, des micronutriments comme des minéraux et vitamines et enfin des caroténoïdes (Kim *et al.*, 2004 ; Qin *et al.*, 2010 ; Zhu, 2016).

Les graines renferment des protéines à une teneur de 85 à 188 mg/g selon la variété (Aubrecht & Biacs, 2001 ; Krkošková & Mrazova, 2005 ; Li & Zhang 2001).

Le sarrasin contient aussi des antioxydants, principalement de la rutine, de la quercétine et de l'hypérine. Ce sont des flavonoïdes, composés phénoliques appartenant à la classe des flavonols (Morishita *et al.*, 2007). Il s'avère que le sarrasin de Tartarie possède une teneur élevée notable de 19,02 mg/g en flavonoïdes comparée au sarrasin commun qui n'en contient que 0,28 mg/g. La rutine, le plus abondant des polyphénols est représenté par 81 milligrammes/gramme dans le gruaud de *F. tataricum* versus 0,2 mg/g dans celui de *F. esculentum*, soit à un niveau 83 fois plus élevé (Jiang *et al.*, 2007 ; Wijngaard & Arendt, 2006). Dans tous les cas, le sarrasin contient plus de rutine que les autres céréales (Ahmed *et al.*, 2014).

La rutine contribue à l'activité antioxydante totale à hauteur de 90% environ. (Fabjan *et al.*, 2003 ; Zielińska *et al.*, 2012). À propos des autres polyphénols, la classe des flavan-3-ols a été discernée uniquement dans le sarrasin commun et la quercétine exclusivement dans le sarrasin de Tartarie (Lee *et al.*, 2016).

Au sujet des minéraux, le zinc, le cuivre et le manganèse sont présents à des teneurs plus élevées dans le sarrasin, toute espèce confondue, que dans les céréales communes riz, blé et maïs (Ikeda *et al.*, 1999; Steadman *et al.*, 2001). Un composé organique qui interagit avec les minéraux, l'oxalate, est sécrété par les racines afin de combattre la toxicité en aluminium faisant surface dans des sols acides. L'aluminium est chélaté à l'extérieur et à l'intérieur ; des complexes d'aluminium non phytotoxiques sont formés avec de l'oxalate ou du citrate. Il s'agit donc d'un autre atout considérable du sarrasin, au regard des 30% de sols acides présents sur la totalité des terres arables (Ma *et al.*, 2001 ; Von Uexküll & Mutert, 1995 ; Wang *et al.*, 2015 ; Zhu *et al.*, 2015). Le sarrasin possède des grains plus riches en vitamines B et E que la plupart des céréales. Le sarrasin de Tartarie contient plus de vitamines B et le sarrasin commun plus de vitamines E (Bonafaccia *et al.*, 2003a ; Ikeda *et al.*, 2006).

Concernant sa culture, la biomasse produite du sarrasin varie entre 5 à 7 tonnes/hectare (Pavek, 2016).

En général, les plantes de sarrasin de Tartarie ont une croissance moins robuste que le sarrasin commun (Campbell, 1997). Le sarrasin de Tartarie a une plus grande adaptabilité écologique avec un rendement plus élevé que le sarrasin commun (Zhu, 2016). Il est en effet plus résistant au froid grâce à une régulation épigénétique due à la méthylation de l'ADN et il est moins affecté par le stress hydrique que *F. esculentum* (Aubert *et al.*, 2021a, Song *et al.*, 2020).

Ce dernier met en place des mécanismes d'évitement à la sécheresse tandis que le sarrasin de Tartarie en est tolérant (Aubert *et al.*, 2021b ; Kasajima *et al.*, 2019 ; Song *et al.*, 2020).

La différence de rendement observé entre les deux espèces s'explique principalement par leur mode de reproduction. Des fleurs plus petites, homostyles et auto-compatibles sont en effet produites par le sarrasin de Tartarie qui ne dépend donc pas de la pollinisation par les insectes pour produire des graines (Wu *et al.*, 2017). Au contraire, le sarrasin commun produit des fleurs hétérostyles et auto-incompatibles (Zhu, 2016). Grâce à la floraison longue, le rendement du sarrasin peut être maintenu si des stress sont subis par les plantes (Aubert *et al.*, 2021b).

Des sols ni trop compacts, ni trop grossiers ou sablonneux conviendront mieux au sarrasin, tout comme un drainage adéquat. Il s'agit d'une culture facile puisqu'il peut pousser sur des sols acides, peu fertiles et pauvres en azote. Aucun pesticide n'est requis puisqu'il inhibe la croissance et le développement des mauvaises herbes grâce à des toxines contenues dans ses

feuilles et tiges, ce qu'on appelle l'effet allélopathique (Khanh *et al.*, 2005 ; Sai, 2021 ; Xuan & Tsuzuki, 2004). Cela constitue un véritable atout dans le contexte des changements climatiques.

La culture du sarrasin est considérée comme peu exigeante, polyvalente et offrant de nombreux avantages (Ahmed *et al.*, 2014 ; Radics et Mikóházi, 2010).

On peut tout d'abord retrouver le sarrasin dans des régions très sèches car ses graines peuvent y germer (Gardner & Boundy, 1983). La plage de température pour la germination et la croissance se situe entre 5 et 42°C mais l'optimal est entre 24 et 26°C (Babu *et al.*, 2018).

De culture réputée rustique (Khanh *et al.*, 2005 ; Rana *et al.*, 2003), il s'adapte à beaucoup de types de sols, même lorsque ceux-ci sont rocheux et mal labourés (Khanh *et al.*, 2005), où il est peu probable de retrouver d'autres céréales (Taylor, 1998). Il a été signalé qu'il peut tolérer un sol à pH acide de 4,8. Néanmoins, les sols sablonneux avec un bon drainage regroupent les meilleures conditions (Jung *et al.*, 2015). Il ne requiert cependant qu'une relative mince quantité d'eau en comparaison avec les principales cultures mondiales.

270 litres lui suffisent ainsi pour produire 1 kilogramme de graines versus 900 litres pour 1 kilogramme de blé (Jacquemart *et al.*, 2012). Cela lui confère alors un avantage considérable dans le cadre des sécheresses. Enfin, il peut être stocké sur un temps relativement long et ses composés phénoliques et antioxydants lui permettent de ne développer aucune détérioration (Ahmed *et al.*, 2014 ).

En ce qui concerne sa production mondiale, elle est principalement assurée par des pays de l'hémisphère nord que sont la Russie, la Chine, la France et l'Ukraine (Koval *et al.*, 2020).

Durant la période 2014-2020, beaucoup de variations de production et de surface cultivée sont constatées que cela soit au niveau mondial ou localement en France. En 2014, 1,9 million de tonnes de sarrasin ont été produites sur 2 millions d'hectares dans le monde (Fig 4).

En France, il s'agissait d'environ 110 000 tonnes sur 30 000 hectares. Pour l'année 2017, cela s'élève à 3 millions de tonnes mondialement produites sur 3 millions d'hectares (Fig 4).

La Russie est le premier producteur avec 1,5 million de tonnes et la Chine 2<sup>e</sup> avec 0,5 million de tonnes produites. 260 000 tonnes ont été produites sur 75 000 hectares de l'Hexagone, ce qui place la France en 3<sup>e</sup> position. La production de sarrasin et la surface cultivée y ont donc été respectivement multipliée et étendue par un facteur supérieur à deux en seulement trois années. Ces chiffres nous permettent de nous rendre compte que le rendement est très élevé.

Il est d'environ 3,5 tonnes par hectare ce qui place la France à la première place dans le monde pour lequel la moyenne de productivité est de 1 tonne par hectare.

En 2020, la production mondiale a régressé à 1,8 million de tonnes sur une surface cultivée rétrécie à 1,9 million d'hectares mondiaux (Fig 4).

En étudiant succinctement l'historique de la production de sarrasin grâce aux données figurant sur le site de la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), on remarque un sommet de production mondiale en 1992 à 5 millions de tonnes pour près de 5 millions d'hectares cultivés (Fig.4). Entre les années 1960 jusqu'aux années 2000 environ, l'Asie et particulièrement la Chine demeurent le premier producteur de sarrasin. Cette tendance s'inverse ensuite puisque c'est l'Europe avec la Russie qui fournit davantage (FAOSTAT, 2018-2022).

On peut donc conclure que la production du sarrasin a subi bon nombre de variations à partir du moment où les chiffres ont été répertoriés, soit 1961 et on peut émettre l'hypothèse d'une attribution à des intérêts incertains des sociétés agricoles dans sa culture mais aussi à sa gestion imprécise due à des connaissances limitées sur le sujet.

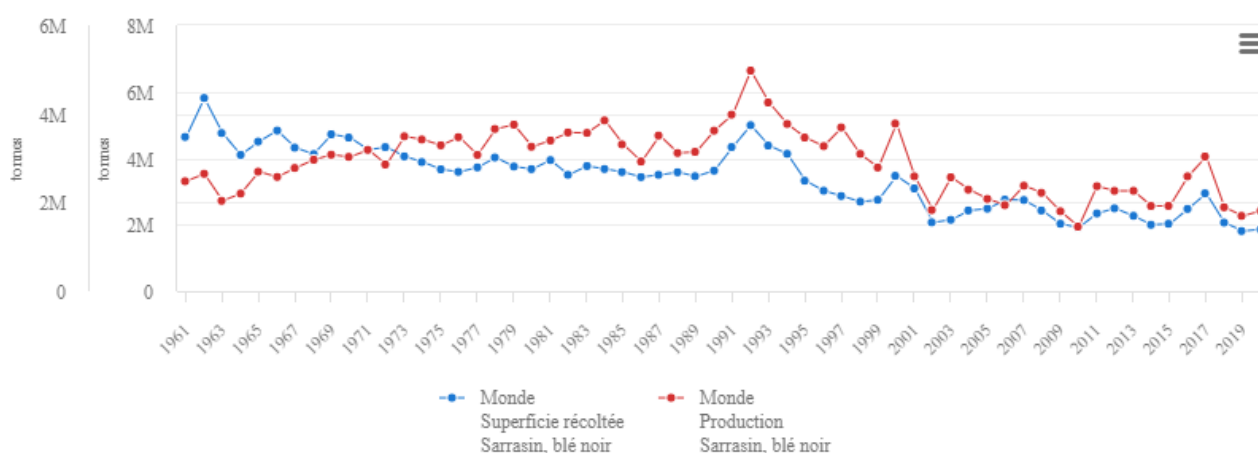


Figure 4 : Production et superficie récoltée mondiales du sarrasin entre 1961 et 2020 (FAOSTAT)

#### 4.4 Propriétés

Nous pouvons ensuite passer en revue les diverses propriétés du sarrasin qui confèrent des bienfaits tant à la santé qu'à la biodiversité.

La consommation de sarrasin retardent le développement des maladies chroniques du cancer, de l'hypercholestérolémie, de l'hypertension, de l'obésité, des maladies cardiovasculaires, de la formation des calculs biliaires, du diabète et permet de s'en protéger (Baumgartel *et al.*, 2003 ; Gimenez-Bastida & Zielinski, 2015 ; Huda *et al.*, 2021 ; Koval *et al.*, 2020 ; Luthar *et al.*, 2021 ; Mahata, 2018 ; Oomah & Mazza, 1996 ; Yilmaz *et al.*, 2020 ; Zhu, 2016). La rutine permet ainsi de réduire la fragilité des vaisseaux sanguins associée aux maladies hémorragiques, diminue leur perméabilité et a un effet anti-œdème (Baumgartel *et al.*, 2003 ; Li *et al.*, 2012 ; Oomah & Mazza, 1996 ; Peng *et al.*, 2013 ; Tuan *et al.*, 2013).

C'est une grande source de protéines par rapport aux céréales conventionnelles avec près de 12 acides aminés nécessaires au bon fonctionnement du corps humain (Mahata, 2018).

Les fibres alimentaires présentes à hauteur de 6 grammes pour 1 tasse de sarrasin accélèrent le transit intestinal mais celui-ci permet aussi de protéger les organes digestifs des infections et de prévenir le stress oxydatif et de nombreuses maladies dans le tractus gastro-intestinal (Mahata, 2018).

Son effet anti-diabétique réside dans un faible index glycémique. Cela signifie qu'il libère des glucides de façon lente et continue dans le sang, permettant au corps de libérer des quantités moins importantes d'insuline pour y faire face. Les personnes diabétiques peuvent trouver dans le sarrasin une source exceptionnelle de nutriments et d'énergie (Kawa *et al.*, 2003 ; Yilmaz *et al.*, 2020).

L'absence de gluten dans les graines du blé noir, son autre appellation, permet aux personnes souffrant de maladies cœliaques ou intolérantes de le consommer (Yadav & Yadav, 2022).

Les différents minéraux et vitamines permettent de surcroît une meilleure digestion, une croissance et une récupération musculaires plus efficaces, une défense contre le stress, une circulation et un fonctionnement des vaisseaux sanguins maintenue et de lutter contre la dépression, l'anxiété et les maux de têtes (Mahata, 2018).

Enfin, puisque certains composants bioactifs comme la rutine sont présents en plus grand nombre dans le sarrasin de Tartarie, il a été montré que divers troubles sont prévenus et traités de façon plus efficace (Yadav & Yadav, 2022).

Côté biodiversité, la culture du sarrasin induit de nombreux effets positifs sur le sol.

La texture et la porosité du sol sont améliorées, la terre devient plus aérée et retient plus d'eau. L'humus augmente tout comme les éléments nutritifs. Elle permet aussi de prévenir l'érosion et de retarder la libération de gaz polluants dans l'atmosphère. Enfin, puisqu'il s'agit d'une culture qui ne nécessite ni engrais ni pesticides, peu d'entretien et peu d'irrigation, elle apporte une contribution non négligeable à la limitation des impacts des changements climatiques et à l'assurance de la sécurité alimentaire future (Small, 2017).

#### 4.5 Utilisation

Enfin, voici une description concise de l'utilisation du sarrasin dans l'alimentation et l'agriculture.

Le sarrasin est surtout consommé à travers le monde en galettes (comme en Bretagne), farine et grains grillés appelés alors « kasha », mis dans des salades et de nombreux plats traditionnels juifs, polonais et d'autres groupes ethniques (Small, 2017). Divers produits alimentaires moins répandus à base de sarrasin sont fabriqués comme du pain, des nouilles, des biscuits et gâteaux, du thé, de l'alcool, du vinaigre, du porridge, des soupes ou encore des ragoûts (Small, 2017 ; Zhu, 2016).

Il est présent dans l'alimentation au Japon sous forme de bière sans gluten et de gruaux produisant des bouillies et des céréales du petit-déjeuner. Des nouilles avec de la farine de sarrasin et de blé appelées soba sont combinées avec du thé vert pour former du Chasoba, servi lors d'occasions spéciales (Small, 2017).

Le nectar de bonne qualité produit par la plante est transformé en miel. La coque des grains sert à confectionner des oreillers, la paille nourrit le bétail et les feuilles infusées dans du thé traitent l'hypertonie.

Les Népalais se nourrissent d'une gamme de 34 aliments à partir du sarrasin dont le dhindo, bouillie épaisse à laquelle ils accordent une préférence (Gondola & Papp, 2010 ; Joshi, 2008).

On peut constater que le sarrasin est utilisé de façon similaire au riz et aux pommes de terre.

Le sarrasin occupe en outre une large palette de rôles dans l'agriculture. Pour favoriser la biodiversité, sa culture est désignée en tant que culture de rupture pour inhiber le développement des insectes, ravageurs et maladies, culture d'engrais vert, culture étouffante des mauvaises herbes, culture pollinisatrice, culture fournissant de la nourriture et un habitat à la faune, culture biologique, culture fourragère (pour les abeilles) ou encore plante nourricière. Pour les sols, elle s'emploie comme culture de couverture pour les protéger et les améliorer en vue de cultures plus productives, culture d'amendement de leur texture, culture

de conservation d'éléments nutritifs, culture sans travail du sol et culture de récupération des terres. Elle se nomme aussi culture d'accompagnement, culture de rotation, culture d'urgence et culture de subsistance (Babu *et al.*, 2018 ; Sai, 2021 ; Small, 2017).

Enfin, le sarrasin assure la protection d'une culture principale contre des animaux sauvages (Babu *et al.*, 2018 ; Maurya *et al.*, 2021).

## 5. Objectifs et hypothèses du mémoire

Suite à cette synthèse bibliographique, nous pouvons énoncer le but de ce mémoire. Il s'agit de comparer les impacts des stress thermique et hydrique sur la croissance, la reproduction et la qualité des graines de 2 variétés de sarrasin de Tartarie (Islek et Lifago). Ces deux variétés ont été sélectionnées à la suite d'un screening et ont montré les comportements les plus différents (Aubert et Quinet, 2022). Les objectifs de ce mémoire sont (1) observer et comparer le comportement des 2 variétés de sarrasin de Tartarie lorsque celles-ci sont soumises à une hausse de température, à un stress hydrique et à leur combinaison en termes de croissance et de production des graines grâce à des mesures morphologiques et physiologiques (2) comparer les teneurs en antioxydants et minéraux chez les 2 variétés de plantes soumises aux 4 traitements différents et en conclusion (3) déterminer quelle serait la variété la plus intéressante à retenir pour en développer la culture dans les années futures compte tenu du contexte climatique pour l'alimentation mais aussi la santé humaine et de la nature.

Plusieurs hypothèses peuvent ainsi être émises :

La variété Islek sera plus affectée par les stress thermique et hydrique.

La variété Lifago sera la plus résistante aux stress thermique et hydrique.

La combinaison des stress aura un plus fort impact sur les plantes que lorsqu'ils sont séparés.

La teneur en antioxydants et minéraux dans les graines sera plus faible en cas de stress thermique et hydrique.

Les plantes vont mettre en place des stratégies de tolérance vis-à-vis des stress.

## II- Matériels et méthodes

### 1. Matériel végétal

Notre sujet de recherche porte sur 2 variétés de sarrasin de Tartarie *Fagopyrum tataricum* (L.) Gaertn., 1790. Les graines de la variété Islek proviennent du Luxembourg et nous ont été fournies par Mr. Christian Zewen tandis que celles de la variété Lifago sont originaires d'Allemagne et nous ont été fournies par le Crop Research Institute de Prague.

### 2. Culture et application des stress

Environ 200 graines des 2 variétés ont été semées le 10 février dans des terrines à semis en plastique dans du terreau (substrat d'argile n°9 eleve TCM). Des vitres en plexiglas ont été placées dessus pour recouvrir les graines le temps de leur germination, maintenant ainsi une certaine humidité, dans une serre tempérée.

Puis, dès l'émergence des plantules, un arrosage régulier de trois fois par semaine (eau de pluie) a été réalisé. Le 24 février, nous avons procédé au repiquage de 186 plantes dans des pots de 1,5 L contenant du terreau. Les plantes ont été mises dans 2 logettes différentes.

La première présentait une température moyenne de 22,36 +/- 2,20 °C et une hygrométrie moyenne de 43 +/- 0,12 %. La deuxième présentait une température moyenne de 27,79 +/- 1,29 °C et une hygrométrie moyenne de 62 +/- 0,13 %. Chacune des logettes était équipée d'un éclairage d'appoint LED LumiGrow pro 650 Watts, afin d'obtenir une photopériode de 16 heures.

Le 28 février, les stress suivants ont été appliqués :

- Témoin (21°C ST) : une température de 21°C et un arrosage régulier de trois fois par semaine
- Stress hydrique (21°C SH) : une température de 21°C et un arrosage réduit
- Stress thermique (28°C ST) : une température de 28°C et un arrosage régulier de trois fois par semaine
- Stress thermique et hydrique (28°C SH) : une température de 28°C et un arrosage réduit

Le stress hydrique (50 % de la capacité au champ) consistait à fournir de l'eau lorsque la teneur en eau du sol, mesurée tous les lundis sur 6 plantes par variété et par traitement grâce à une sonde (ProCheck, Decagon Devices), était inférieure à 15%. La teneur en eau des plantes témoins après arrosage (sol ressuyé) était de 30%.

Les arrosages réguliers étaient réalisés les lundi, mercredi et vendredi. Pour les plantes dans la logette à 28°C, un arrosage plus abondant était réalisé pour pallier à l'évaporation plus rapide.

Voici le détail des positionnements des plantes dans les 2 logettes :



Il y avait dans la logette à 21°C :

- 21 plantes Lifago en stress hydrique,
- 22 plantes Lifago en condition témoin,
- 22 plantes Islek en stress hydrique et
- 21 plantes Islek en condition témoin.

Dans la logette à 28°C, étaient disposées :

- 22 plantes Lifago en stress hydrique et thermique,
- 21 plantes Lifago en stress thermique,
- 29 plantes Islek en stress hydrique et thermique et
- 28 plantes Islek en stress thermique.

La culture du sarrasin a duré 78 jours au total entre le semis du 10 février et la récolte finale du 29 avril.

### 3. Suivis morphologiques

#### 3.1 Dans le temps

Un tirage aléatoire des numéros de plantes a été réalisé afin de procéder aux comptages. Chaque semaine, du début de la croissance à la récolte finale, 3 mesures ont été réalisées sur 10 plantes par variété et par traitement, soit 80 plantes au total :

- le nombre de feuilles complètement formées. Une feuille est considérée comme formée une fois qu'elle est déroulée et qu'il est possible de calculer sa surface foliaire.
- le nombre d'inflorescences dès leur apparition
- la taille de la plante évaluée grâce à un mètre de la surface de la terre jusqu'au nœud terminal

#### 3.2 Ponctuels

Lors de la récolte finale le 29 avril, nous avons tiré aléatoirement les numéros de 4 plantes par traitement et par variété pour obtenir plusieurs données de comptage :

- Nombre total de graines vertes
- Nombre total de graines brunes
- Nombre total de ramifications
- Nombre moyen de feuilles par ramification
- Nombre moyen d'inflorescences par ramification

### 4. Poids frais et sec

2 récoltes ont été organisées, les 4 et 29 avril pour déterminer les poids frais et sec des feuilles, des inflorescences et des tiges ainsi que des graines mais uniquement pour la récolte finale (29 avril).

Pour chaque date, trois plantes ont été récoltées par traitement et par variété et les différents organes ont été séparés. Ils ont été placés dans des enveloppes, tarage fait au préalable, et pesés grâce à une balance avec une précision au millième de grammes.

Puis, ces enveloppes ont été positionnées à l'étuve à 70°C pendant 72 heures pour pouvoir peser le poids sec par la suite.

Ces 2 mesures sont utilisées pour la détermination de la teneur en eau, calculée grâce à cette formule : 
$$\text{Teneur en eau} = \frac{\text{Poids frais} - \text{Poids sec}}{\text{Poids frais}} * 100$$

## 5. Mesures physiologiques

### 5.1 PNA

Le 22 mars, 5 plantes par traitement et par variété ont été tirées aléatoirement pour la mesure des teneurs en chlorophylle et azote.

L'outil utilisé est le Plant Nutrition Analyzer (TYS-3N/4N, Top Cloud-agri Technology) qui est muni d'une pince que l'on referme sur une feuille. Avant utilisation, on procède à une calibration en fermant la pince sur elle-même.

La pince de l'appareil a été appliquée sur la plus jeune feuille développée à 2 endroits différents donc on dispose de 2 mesures par plante.

### 5.2 Fluorimètre

Le 1<sup>er</sup> avril, 4 plantes par traitement et par variété ont été tirées aléatoirement pour des mesures de fluorescence de la chlorophylle. L'outil utilisé est le fluorimètre (FMS II, Hansatech Instruments Ltd) qui possède une pince dotée d'une fenêtre obturatrice, appliquée sur la plus jeune feuille développée de la plante. Durant 30 minutes, une partie de la feuille se retrouve privée de lumière ambiante. Puis, l'appareil va ensuite procéder à la mesure de la fluorescence initiale (F0) et produire 2 faisceaux de lumière saturante à 1800  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  séparés de 2 minutes. L'intensité de la fluorescence maximale (Fm) est mesurée suivie de celle concernant l'adaptation à la lumière actinique, auxquelles les feuilles auront précédemment été exposées durant 2 minutes à une valeur de 660  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ . Parmi les nombreux paramètres de fluorescence délivrés par la machine, les paramètres pris en compte ici sont l'efficacité du photosystème II ( $\phi\text{PSII}$ ), le nombre de centres réactionnels ouverts représenté par le « photochemical quenching » qP, et la part d'énergie qui n'est pas allouée à la photosynthèse, représenté par le « non-photochemical quenching » (NPQ).

### 5.3 Poromètre

Le poromètre (type AP4, Delta-T Devices) a également été utilisé en parallèle du fluorimètre sur la même feuille des mêmes plantes pour mesurer la conductance stomatique. Après étalonnage à l'aide d'une plaque fournie avec 6 valeurs précises de conductance stomatique, la pince est appliquée sur la feuille. L'appareil mesure alors la conductance stomatique (mmol/m<sup>2</sup>.s) en comparant le taux précis d'humidification dans une petite cuvette (chambre) aux lectures obtenues avec la plaque d'étalonnage. Les valeurs vont s'afficher en continu et on valide lorsque les valeurs se stabilisent.

### 5.4 Osmomètre

Pour la mesure du potentiel osmotique, la plus jeune feuille développée a été prélevée sur 3 plantes par traitement et par variété lors de la 1<sup>ère</sup> récolte le 4 avril, coupée en morceaux et disposée dans un eppendorf troué stocké dans le congélateur à -80°C. Le 29 juin, les eppendorfs ont subi 3 cycles de gel/dégel, c'est à-dire quelques secondes dans de l'azote liquide et 5 minutes de dégel. On les place ensuite dans des eppendorfs non troués pour récupérer le filtrat après centrifugation pendant 15 minutes à 4°C à 8000 rpm.

On procède à la calibration initiale de l'osmomètre (Model 5600 Vapro®, ELITechGroup) par la suite grâce à 3 ampoules de solutions de valeurs différentes (290, 1000 et 100 mmol/kg). Il faut ensuite recalibrer toutes les 20 mesures. On dépose à l'aide d'une micropipette 10 µl de l'échantillon sur une pastille en papier déposée sur la tablette de la machine puis on note la mesure affichée en mmol/kg. 3 répétitions de mesure sont réalisées par échantillon.

Ces données, transformées en moyenne, sont converties en MégaPascals grâce à la formule :

$$PO (MPa) = \frac{PO (mmol/kg) * 2,577433}{1000} * -1.$$

## 6. Mesures biochimiques

Deux récoltes ont été réalisées les 4 et 29 avril pour procéder au prélèvement des feuilles, inflorescences et graines sur 3 plantes par traitement et par variété. Après les avoir enfermés dans des aluminiums trempés dans de l'azote liquide, les échantillons ont été stockés dans le congélateur à - 80°C et broyés dans de l'azote liquide pour faire les expériences ultérieures.

### 6.1 MDA

Le protocole utilisé est celui de Heath & Packer (1968). Le 4 juillet, environ 250 mg de feuilles broyées sont transférés dans un falcon auquel on ajoute 5 mL d'acide trichloroacétique (TCA) 5% contenant 1,25% de glycérol. Une centrifugation des falcons est faite durant 10 minutes à 4°C à 1200 *g*. Une filtration de l'homogénat en résultant est effectuée par papier filtre Whatman n°1 et 2 mL de surnageants sont ainsi récupérés dans des nouveaux falcons. On y ajoute 2 mL d'acide thiobarbiturique (TBA) 0,67%. Les échantillons sont ensuite chauffés au bain-marie à 100°C pendant 30 minutes. Deux blancs subissent la même opération, 1 blanc avec 4 mL de TCA et 1 blanc avec 2 mL de TCA et 2 mL de TBA. Après un refroidissement sur glace, on centrifuge tous les falcons pendant 1 minute à 4°C à 1200 *g*. Enfin, on utilise le spectrophotomètre (UV-1800, Shimadzu™) pour mesurer l'absorbance à 532 et 600 nm. La première absorbance est soustraite à la deuxième. La concentration de MDA dans la cuvette est calculée en utilisant la formule :  $C_c \text{ (mmoles/L)} = \frac{Abs}{\epsilon}$  avec  $\epsilon$  égal à 155 mM<sup>-1</sup>.cm<sup>-1</sup>, le coefficient d'extinction molaire. La concentration de MDA dans l'échantillon de départ est obtenue grâce à la formule :  $C_c \text{ (mmoles/g MF)} = \frac{C_c \text{ (mmoles/L)} * \text{dilution} * \text{volume de départ (L)}}{\text{masse (g)}}$ , ici la dilution est de 2 et le volume de départ est de 0.005 L.

### 6.2 Polyphénols et flavonoïdes

Afin de procéder à l'extraction des polyphénols et flavonoïdes selon la méthode modifiée de Zhang et al. (2010), environ 100 mg d'inflorescences broyées sont placés dans des eppendorfs dans lesquels on ajoute 1,8 mL de méthanol à 80%. Ces derniers subissent une centrifugation pendant 20 minutes à 4°C à 20 000 *g* puis sont conservés à - 20°C. Puisque le sarrasin

contient beaucoup de ces molécules, une dilution de 10 a été appliquée sur les échantillons extraits.

La teneur en polyphénols totaux est déterminée selon la méthode de Singleton et Rossi (1965) figurant dans Ramful *et al.* (2010), par la méthode colorimétrique de Folin-Ciocalteu.

200 µl de chaque échantillon extrait ont été mélangés avec 2800 µl d'eau distillée, 200 µl de réactifs de Folin-Ciocalteu et 0,8 ml de carbonate de sodium Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. 3 blancs avec 200 µl de méthanol, 2800 µl d'eau distillée, 200 µl de réactifs de Folin-Ciocalteu et 0,8 ml de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ajouté après 3 minutes sont préparés.

Les tubes sont agités et incubés pendant 40 minutes dans un bain-marie à 40°C. Les tubes sont ensuite vortexés avant lecture au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 760 nm. Avant leur dosage, une droite de calibration est réalisée via le même mode opératoire avec une solution mère d'acide gallique à 1 mg/mL, à diluer deux fois.

La gamme des concentrations standards s'étend de 0 à 500 µg/mL, de 50 en 50.

Le calcul suivant  $\frac{Cc\text{ brute } (\mu\text{g/mL}) * dilution * Volume\ (mL)}{masse\ (g)}$  nous permet d'obtenir, après conversion, la concentration finale de polyphénols totaux en mg/g.

Le dosage différentiel des flavonoïdes totaux fait intervenir les propriétés chélatantes des ions. Dans des petits tubes en verre, on mélange 0,7 mL de la solution de chaque extrait à 0,7 mL de chlorure d'aluminium AlCl<sub>3</sub> 2%. Trois blancs avec 0,7 mL de méthanol et 0,7 mL AlCl<sub>3</sub> 2% sont préparés. Ils sont passés au vortex puis placés à l'obscurité durant 10 minutes, avant lecture au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 440 nm. Avant leur dosage, une courbe d'étalonnage est réalisée dans les mêmes conditions opératoires que les échantillons avec une solution mère de quercétine à 1 mg/mL, à diluer vingt fois. La gamme des concentrations standards s'étend de 0 à 50 µg/mL de 5 en 5.

Le calcul suivant  $\frac{Cc\text{ brute } (\mu\text{g/mL}) * dilution * Volume\ (mL)}{masse\ (g)}$  nous permet d'obtenir, après conversion, la concentration finale de flavonoïdes totaux en mg/g.

## 7. Récolte et qualité des graines

### 7.1 Poids de 1000 grains

Le poids de 1000 grains a été estimé pour chaque variété et traitement sur les graines récoltées le 29 avril, en pesant le poids de 20, 50 ou 100 graines en triplicats en rapportant le poids à 1000 graines.

### 7.2 Minéralisations

Le dosage des minéraux s'est effectué le 12 septembre sur les graines des 3 mêmes plantes par traitement et par variété utilisées pour peser les poids frais et sec (voir partie 4).

Environ 50 à 100 mg de graines sèches sont broyées grossièrement et placées dans une fiole jaugée de 10 mL, dans laquelle on ajoute 4 mL d'acide nitrique. 4 blancs ont aussi été préparés. Durant une nuit, on laisse la matière organique se dissoudre complètement sous une hotte non chauffée. Les jaugés sont ensuite placés sur un bain de sable jusqu'à évaporation complète de l'acide nitrique. 2 mL d'eau régale, préparée avec 1,5 mL de chlorure d'hydrogène HCl et 0,5 mL d'acide nitrique, sont ajoutés à chaque jaugé. On les chauffe quelques minutes sur le bain de sable afin de dissoudre les résidus et on complète jusqu'au trait avec de l'eau déminéralisée après refroidissement. La solution obtenue est enfin filtrée à l'aide d'un papier filtre Whatman n°1 et d'un entonnoir dans un falcon de 15 mL.

Pour les éléments Ca et Mg, une dilution au dixième a été réalisée avec 1 mL de l'échantillon non dilué, 1 mL de chlorure de lanthane  $\text{LaCl}_3$  10 % (m/v) et 8 mL d'eau déminéralisée.

Pour l'élément K, il s'agissait d'une dilution au centième en mélangeant 1 mL de l'échantillon dilué 10 fois, 0,9 mL de  $\text{LaCl}_3$  10% (m/v) et 8,1 mL d'eau déminéralisée.

Les teneurs (mg/L) en K, Mg, Ca, Fe, Zn et Cu ont été mesurées grâce au spectrophotomètre à absorption atomique (S Series, ThermoScientific).

La concentration dans l'échantillon en mg/g ou  $\mu\text{g/g}$  (pour les métaux lourds) s'obtient à

l'aide de la formule suivante :  $Cc_{finale} = \frac{Cc_{brute} (mg/L) * Volume\ échantillon (L)}{\frac{poids (mg)}{1000}}$

## 8. Analyses statistiques

Le logiciel R<sup>®</sup>, version 4.1.1 avec l'application RStudio<sup>®</sup> a été utilisé.

Un test de Shapiro-Wilk a permis d'évaluer la normalité des données et un test de Breusch-Pagan (ou ncv test) pour l'homoscédasticité. Des Anovas de type 3 ont été réalisées pour déterminer les différences significatives entre les stress hydrique et thermique et les 2 variétés ainsi que leurs interactions avec une valeur seuil à 5%. Si les conditions n'étaient pas respectées, différentes transformations de la variable d'intérêt ont été opérées comme celle du logarithme, de la racine carrée, de l'inverse... Si celles-ci n'étaient toujours pas concluantes, on procédait à un test de Kruskal-Wallis.

Des tests post-hoc de Tukey ont permis ensuite d'effectuer des comparaisons multiples, pour savoir quels échantillons différaient significativement.

### III- Résultats

#### 1. Croissance

##### 1.1 Taille

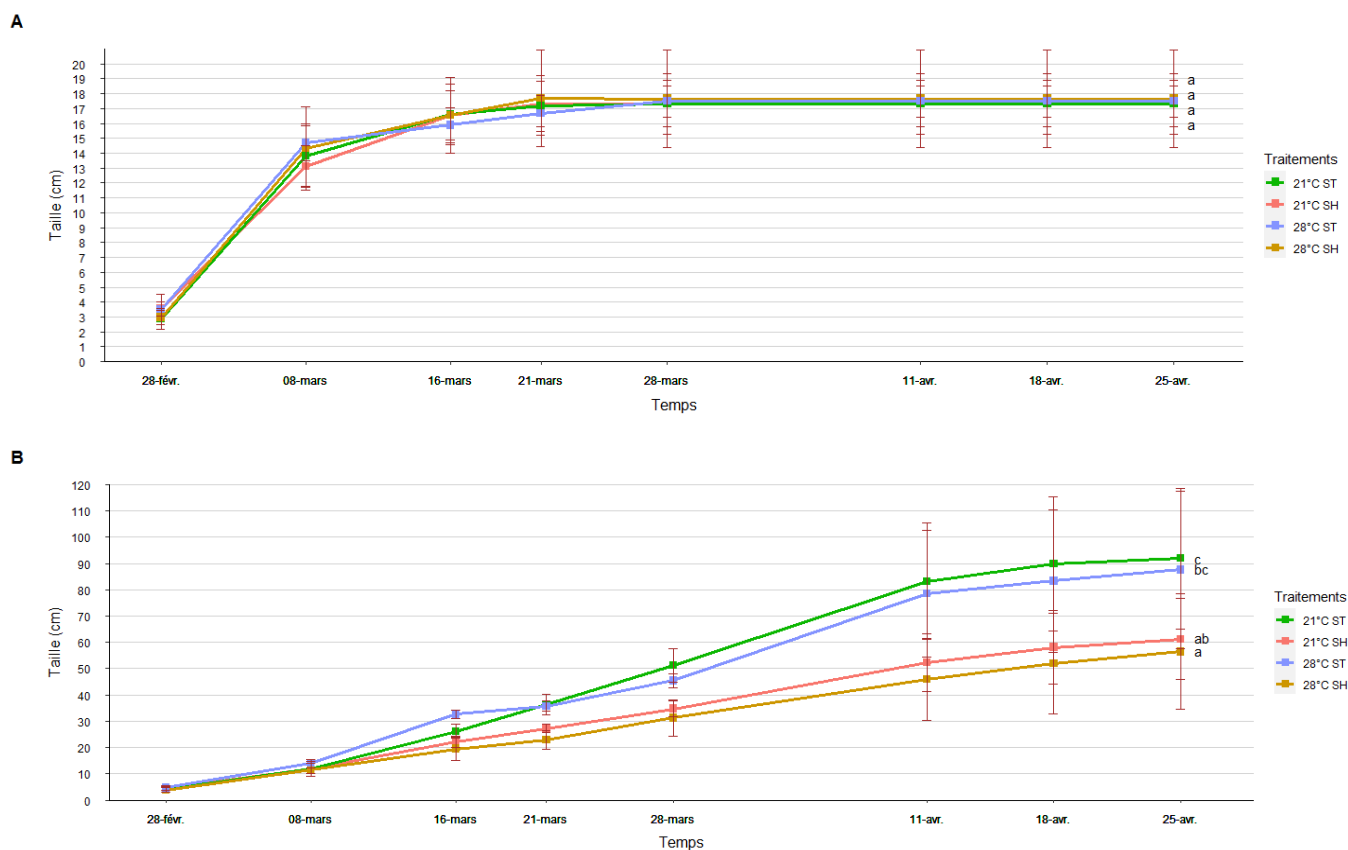


Figure 1.1 : Evolution de la taille au cours du temps chez deux variétés de sarrasin de Tartarie cultivées à 21°C ou 28°C en condition témoin (ST) ou de stress hydrique (SH). (A) variété Islek, (B) variété Lifago. Les traitements partageant une même lettre pour une même variété ne sont pas significativement différents à un seuil de 5%.

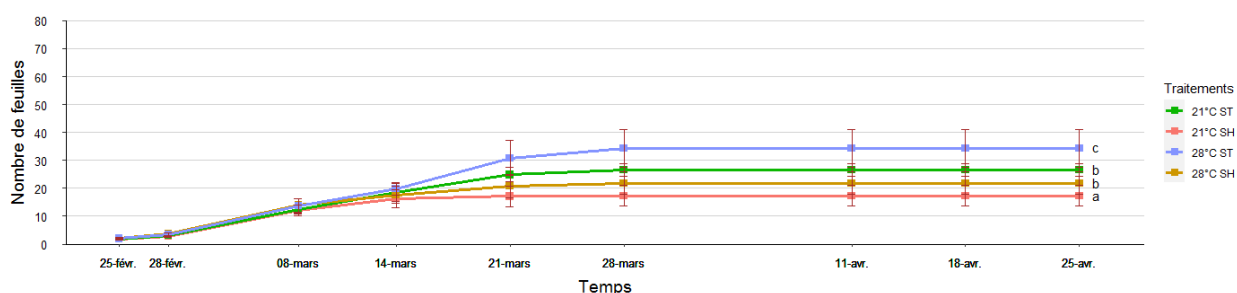
Nous pouvons remarquer que la taille des plantes différait entre les 2 variétés (Figure 1.1, Annexe 5). En fin de culture, les plantes Islek atteignaient 18 centimètres environ contre 60 à 90 centimètres en moyenne chez Lifago. Ainsi les plantes de Lifago étaient de l'ordre de 4 fois plus grandes que celles de la variété Islek.

Chez Islek (Fig 1.1 A), les plantes ont grandi très vite, elles ont quadruplé leur taille en une semaine, quelque soit le traitement, en début de culture. Ensuite, leur taille a augmenté légèrement jusqu'au 28 mars, date à laquelle elles ont atteint leur taille maximale, soit seulement 1 mois après le début de la culture. La croissance des plantes sous les 4 traitements était très similaire donc les stress hydrique et thermique n'ont ainsi pas eu d'effet.

Chez Lifago (Fig 1.1 B), la croissance des plantes était plus progressive. A partir du 16 mars, soit 2 semaines après l'application des stress, on observe une différence de taille selon les traitements. La taille maximale était atteinte en fin de culture (le 25 avril). Le stress hydrique a fortement diminué la taille des plantes. Combiné au stress thermique, il a eu un effet encore plus néfaste puisque la taille des plantes à 28°C SH était largement inférieure à celle à 21°C ST.

## 1.2 Nombre de feuilles

A



B

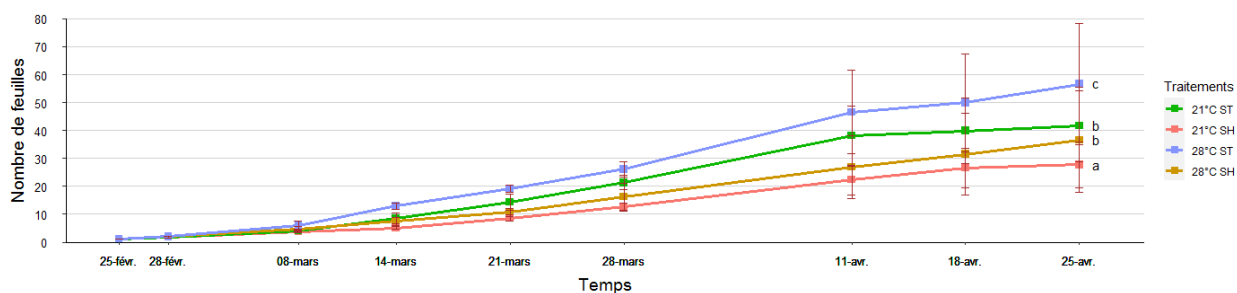


Figure 1.2 : Evolution du nombre de feuilles au cours du temps chez deux variétés de sarrasin de Tartarie cultivées à 21°C ou 28°C en condition témoin (ST) ou de stress hydrique (SH). (A) variété Islek, (B) variété Lifago. Les traitements partageant une même lettre pour une même variété ne sont pas significativement différents à un seuil de 5%.

Comme pour la taille, le nombre de feuilles était plus élevé chez la variété Lifago que chez la variété Islek (Fig 1.2, Annexe 5). Chez les 2 variétés, la température a augmenté le nombre de feuilles tandis que le stress hydrique l'a diminué (Fig 1.2, Annexe 5). Il en résulte que les plantes témoins à 28°C ont produit le plus de feuilles tandis que les plantes stressées à 21°C en ont produit le moins.

Chez la variété Islek (Fig 1.2 A), le nombre de feuilles a fortement augmenté en début de croissance jusqu'à atteindre un plateau à partir du 28 mars. Au contraire, la production de feuilles était plus régulière tout au long de l'expérience chez Lifago (Fig. 1.2 B). En tenant compte de tous les traitements, les plantes de la variété Lifago ont produit environ 1,6 fois plus de feuilles que celles de la variété Islek.

### 1.3 Nombre d'inflorescences

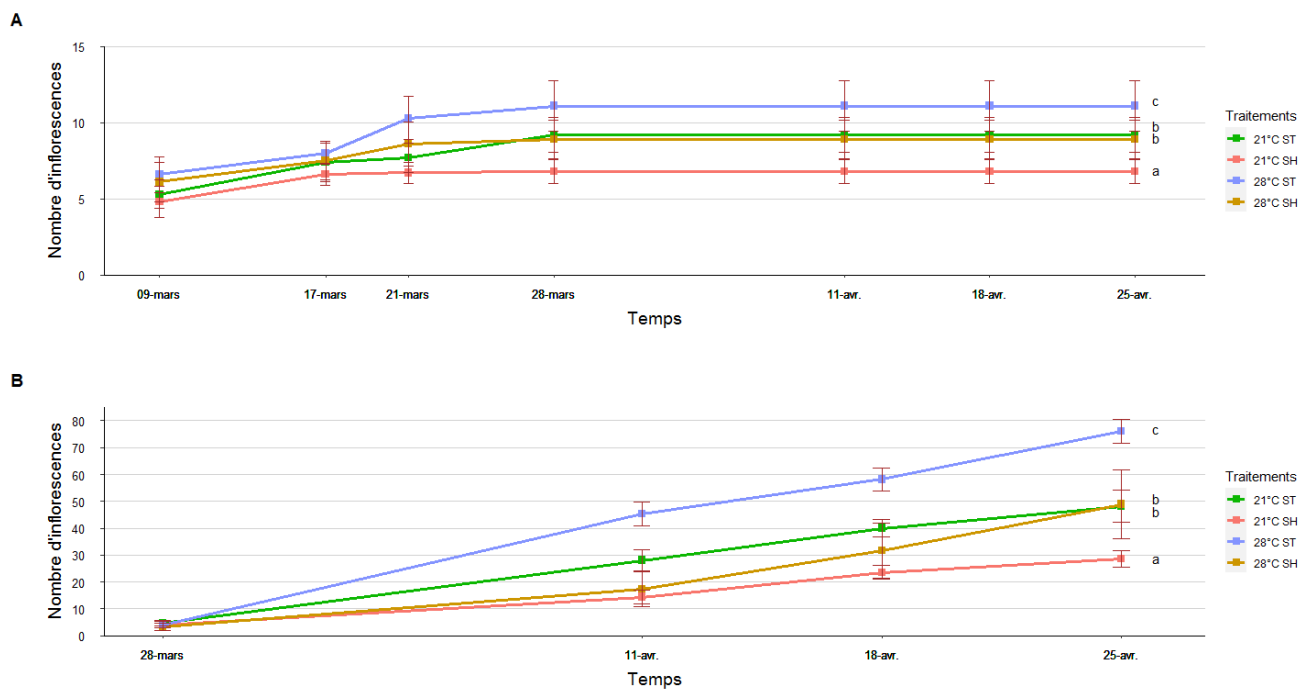


Figure 1.3 : Evolution du nombre d'inflorescences au cours du temps chez deux variétés de sarrasin de Tartarie cultivées à 21°C ou 28°C en condition témoin (ST) ou de stress hydrique (SH). (A) variété Islek, (B) variété Lifago. Les traitements partageant une même lettre pour une même variété ne sont pas significativement différents à un seuil de 5%.

Nous pouvons constater que les inflorescences sont apparues environ 20 jours plus tard sur les plantes de la variété Lifago que sur celles de la variété Islek (Fig 1.3 A, B). Comme pour le nombre de feuilles, le nombre d'inflorescences était plus élevé chez la variété Lifago que chez la variété Islek (Fig 1.3, Annexe 5).

Chez les 2 variétés, une hausse du nombre d'inflorescences a été observée avec le stress thermique tandis qu'il s'agit d'une réduction avec le stress hydrique (Fig 1.3, Annexe 5). Ainsi en découle une production d'inflorescences la plus élevée par les plantes témoins à

28°C en opposition à une production la plus faible par les plantes stressées à 21°C. En fin de culture, le nombre d'inflorescences n'était pas différent entre les traitements 21°C ST et 28°C SH (Fig 1.3). L'interaction des stress thermique et hydrique n'ont eu aucun effet chez les 2 variétés (Annexe 5).

Au début de la croissance des plantes Islek (Fig 1.3 A), on peut constater une augmentation du nombre d'inflorescences jusqu'à une stabilisation à partir du 28 mars. A l'inverse, Lifago a produit ses inflorescences de façon constante pendant toute la durée de la culture (Fig. 1.3 B). En considérant l'ensemble des traitements, la production d'inflorescences des plantes Lifago était environ 3,3 fois plus élevée que celle des plantes Islek.

#### 1.4 Ramifications

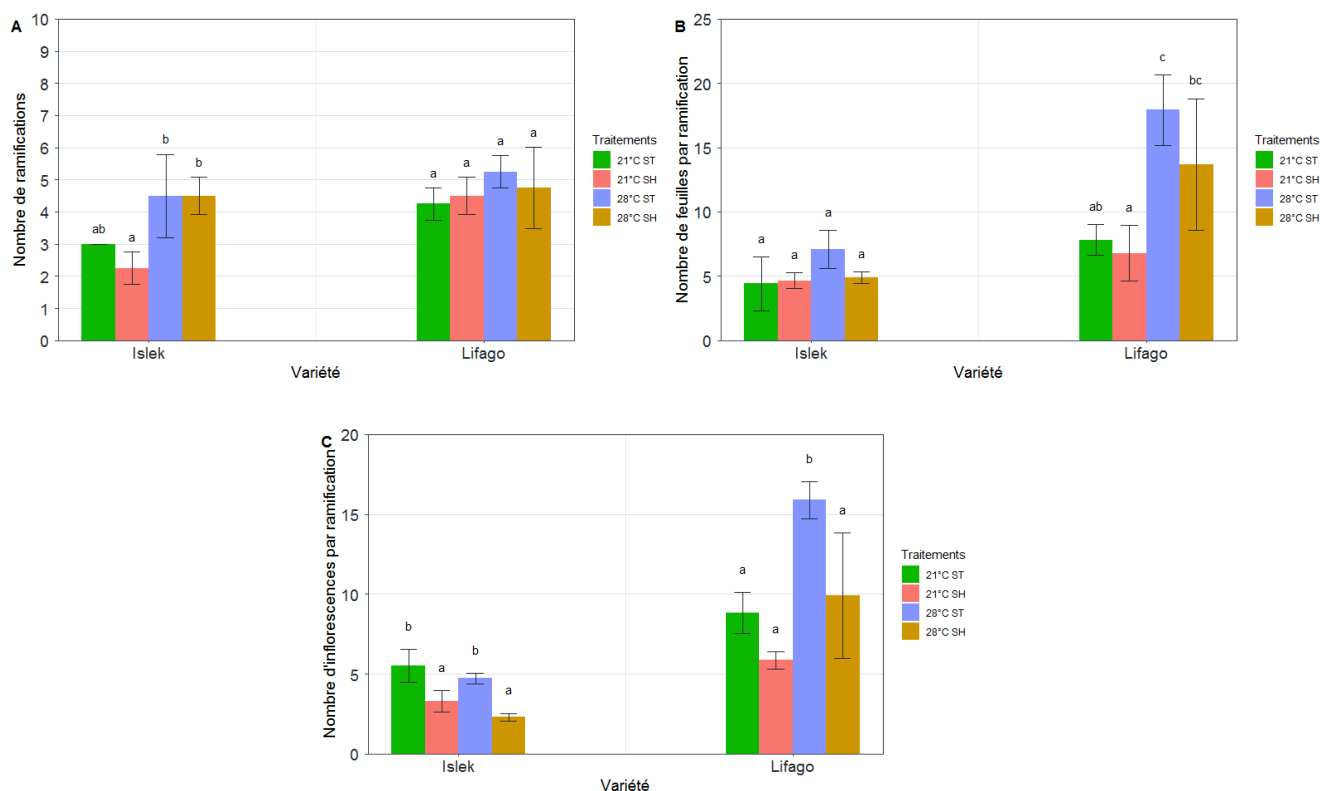


Figure 1.4 : Développement des ramifications après deux mois et demi de culture chez deux variétés de sarrasin de Tartarie cultivées à 21°C ou 28°C en condition témoin (ST) ou de stress hydrique (SH). (A) Nombre de ramifications, (B) Nombre de feuilles par ramification, (C) Nombre d'inflorescences par ramification. Les traitements partageant une même lettre pour une même variété ne sont pas significativement différents à un seuil de 5%.

Comme pour les autres variables de comptage, la variété Lifago a produit à peine plus de ramifications et beaucoup plus de feuilles et d'inflorescences par ramification que la variété Islek (Fig 1.4, Annexe 5).

Concernant le nombre de ramifications, le stress hydrique n'a eu aucun effet chez les deux variétés, tout comme le stress thermique chez Lifago (Fig 1.4, Annexe 5). Cependant, celui-ci a augmenté le nombre de ramifications chez Islek (Fig 1.4 A, Annexe 5), de sorte que les plantes à 28°C avaient environ 4,5 ramifications tandis que les plantes à 21°C en ont produit 2,6.

Quant au nombre de feuilles par ramification, le stress hydrique n'a de même pas eu d'effet chez les deux variétés (Fig 1.4 B, Annexe 5). Le stress thermique a eu un effet significatif chez Lifago mais pas chez Islek. Il a nettement augmenté le nombre de feuilles par ramification chez Lifago. En tenant compte de tous les traitements, les plantes de la variété Lifago à 28°C ont produit environ 2,6 fois plus de feuilles par ramification que les plantes de la variété Islek.

Enfin, le nombre d'inflorescences par ramification a diminué avec le stress hydrique chez les deux variétés (Fig 1.4 C, Annexe 5). Le stress thermique a eu un effet opposé entre les deux variétés puisqu'il a légèrement diminué le nombre d'inflorescences par ramification chez Islek, tandis qu'il l'a plus augmenté chez Lifago (Fig 1.4 C, Annexe 5). En tenant compte de tous les traitements, les plantes de la variété Lifago à 28°C ont produit environ 2,8 fois plus de feuilles par ramification que les plantes de la variété Islek.

## 2. Poids sec et teneur en eau

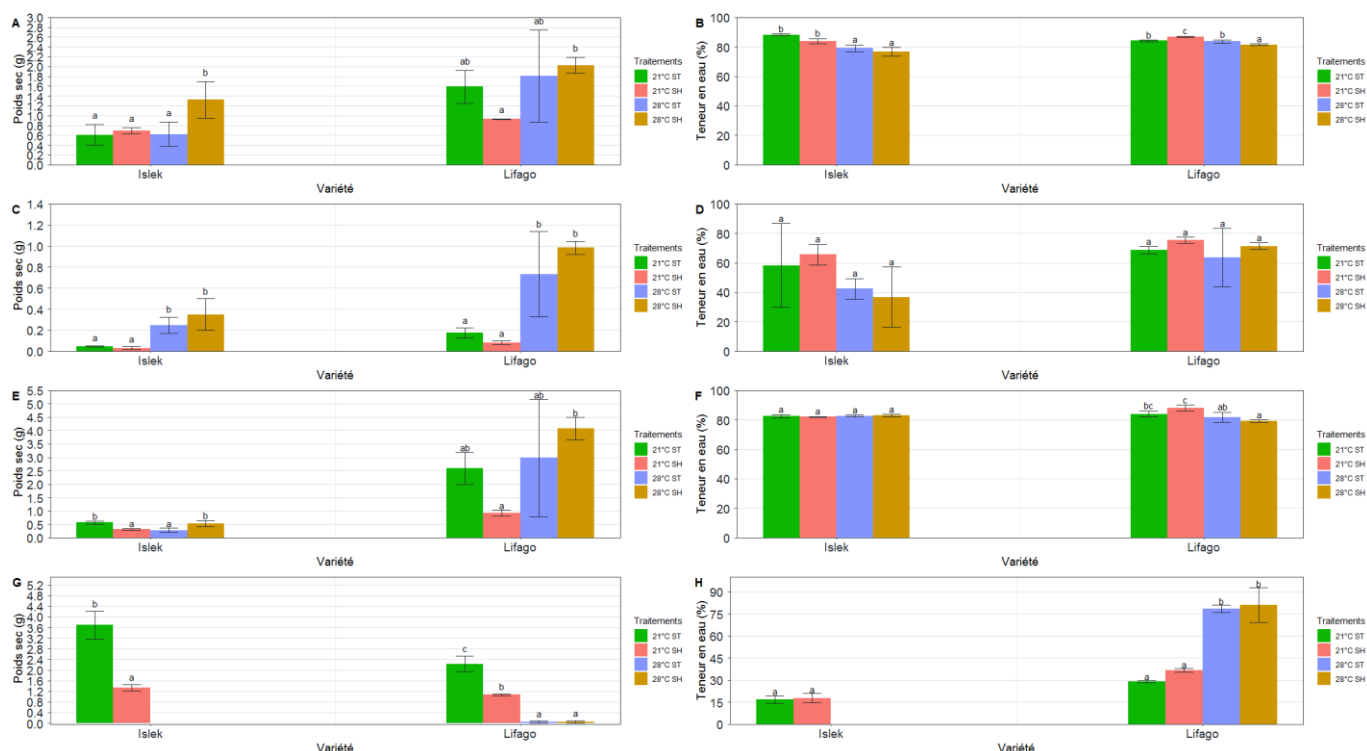


Figure 2.1 : Poids sec (A, C, E, G) et teneur en eau (B, D, F, H) en fonction du type d'organe chez deux variétés de sarrasin de Tartarie cultivées à 21°C ou 28°C en condition témoin (ST) ou de stress hydrique (SH). (A, B) Feuilles, (C, D) Inflorescences, (E, F) Tiges, (G, H) Graines. Les traitements partageant une même lettre pour une même variété ne sont pas significativement différents à un seuil de 5%.

Le poids sec des organes était plus élevé chez la variété Lifago que chez Islek (Fig 2.1, Annexe 5), excepté pour les graines. Le poids sec des feuilles et inflorescences de Lifago était environ 3 fois supérieur à celui des feuilles et inflorescences de la variété Islek. Les tiges de Lifago avaient un poids sec environ 7 fois supérieur à celui des tiges de la variété Islek. Au contraire, pour la condition témoin uniquement, le poids sec des graines Islek était 1,5 fois supérieur à celui des graines Lifago. Le stress hydrique n'a pas affecté le poids sec des feuilles et des tiges chez Lifago ainsi que des inflorescences chez les deux variétés (Fig 2.1 A, C, E, Annexe 5).

Les feuilles et tiges contiennent beaucoup d'eau (85%), les inflorescences dans une quantité moindre (60%) et il y a très peu d'eau dans les graines (6%). La teneur en eau des feuilles différait entre les deux variétés, celle des inflorescences et graines était plus élevée chez Lifago que chez Islek tandis que la teneur en eau des tiges ne différait pas entre les deux

variétés (Fig 2.1 B, D, F, H, Annexe 5). Le stress hydrique n'a pas affecté la teneur en eau des inflorescences et des tiges, les deux variétés confondues (Fig 2.1 D, F, Annexe 5).

Concernant les feuilles, le stress thermique a augmenté leur poids sec chez les plantes des deux variétés stressées hydriquement (Fig 2.1 A, Annexe 5). Le stress hydrique a augmenté le poids sec des feuilles chez Islek à 28°C. Le stress thermique a diminué la teneur en eau des feuilles Islek et également celle des feuilles Lifago stressées hydriquement (Fig 2.1 B, Annexe 5). La teneur en eau des feuilles Lifago à 21°C a augmenté mais diminué à 28°C avec le stress hydrique (Fig 2.1 B, Annexe 5).

Au sujet des inflorescences, le stress thermique a fortement augmenté leur poids sec chez les deux variétés (Fig 2.1 B, Annexe 5). Le stress thermique a diminué légèrement la teneur en eau des inflorescences, mais sans que cela soit significatif, quelle que soit la variété (Fig 2.1 C, Annexe 5). La teneur en eau des inflorescences chez Islek à 28°C était 1,8 fois inférieure à celle chez Lifago à 21°C et 1,7 fois inférieure à celle chez Lifago à 28°C.

Concernant les tiges, le stress thermique a diminué leur poids sec chez les plantes témoins Islek mais l'a augmenté chez les plantes des deux variétés stressées hydriquement (Fig 2.1 E, Annexe 5). Le stress hydrique a diminué chez Islek le poids sec des tiges à 21°C mais l'a augmenté à 28°C. Le stress thermique a diminué la teneur en eau des tiges chez les plantes Lifago stressées hydriquement mais pas chez la variété Islek (Fig 2.1 F, Annexe 5).

Enfin, à propos des graines, Islek n'en a pas produit à 28°C. Les stress hydrique et thermique ont très fortement diminué le poids sec des graines chez les deux variétés (Fig 2.1 G, Annexe 5). Le stress thermique a augmenté la teneur en eau des graines chez Lifago (Fig 2.1 H, Annexe 5). La teneur en eau des graines Lifago à 21°C était environ 1,3 fois supérieure à celle des graines de la variété Islek à 21°C. La teneur en eau des graines Lifago à 28°C était environ 9 fois supérieure à celle des graines Islek à 28°C.

### 3. Paramètres physiologiques

#### 3.1 PNA

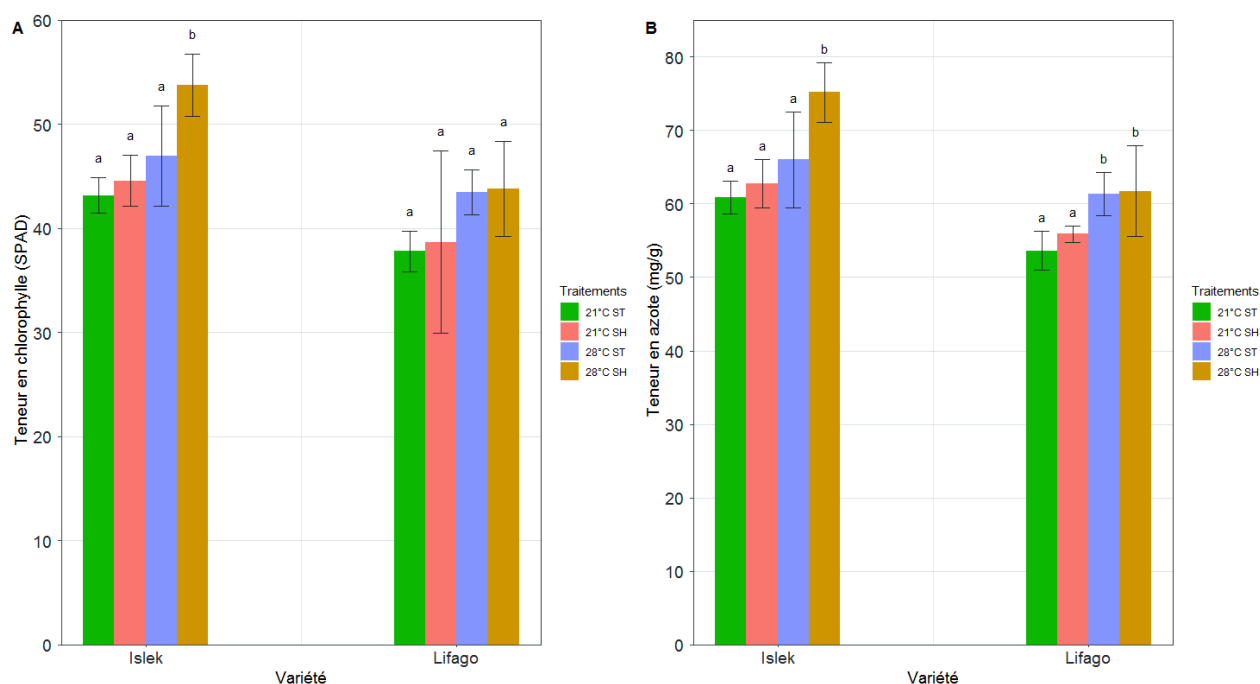


Figure 3.1 : Analyse de la nutrition de la plante chez deux variétés de sarrasin de Tartarie cultivées à 21°C ou 28°C en condition témoin (ST) ou de stress hydrique (SH). (A) Teneur en chlorophylle, (B) Teneur en azote. Les traitements partageant une même lettre pour une même variété ne sont pas significativement différents à un seuil de 5%.

Nous pouvons remarquer que les teneurs en chlorophylle et azote des feuilles étaient plus élevées chez Islek que chez Lifago (Fig 3.1, Annexe 5). La teneur en chlorophylle était environ 1,15 fois supérieure chez Islek que chez Lifago. La teneur en azote était environ 1,7 fois supérieure chez Islek que chez Lifago.

Concernant la teneur en chlorophylle, les stress hydrique et thermique n'ont eu aucun effet chez les plantes Lifago (Fig 3.1 A). Au contraire, chez Islek, les stress hydrique et thermique ont respectivement augmenté la teneur en chlorophylle pour les plantes à 28°C et celles stressées hydriquement (Fig 3.1 A, Annexe 5). Concernant la teneur en azote, le stress thermique l'a augmentée chez Lifago et chez les plantes Islek stressées hydriquement (Fig 3.1 B, Annexe 5). Le stress hydrique a augmenté la teneur en azote chez les plantes Islek à 28°C tandis qu'il n'a pas eu d'effet chez Lifago (Fig 3.1 B, Annexe 5).

### 3.2 Conductance stomatique et phase photochimique de la photosynthèse

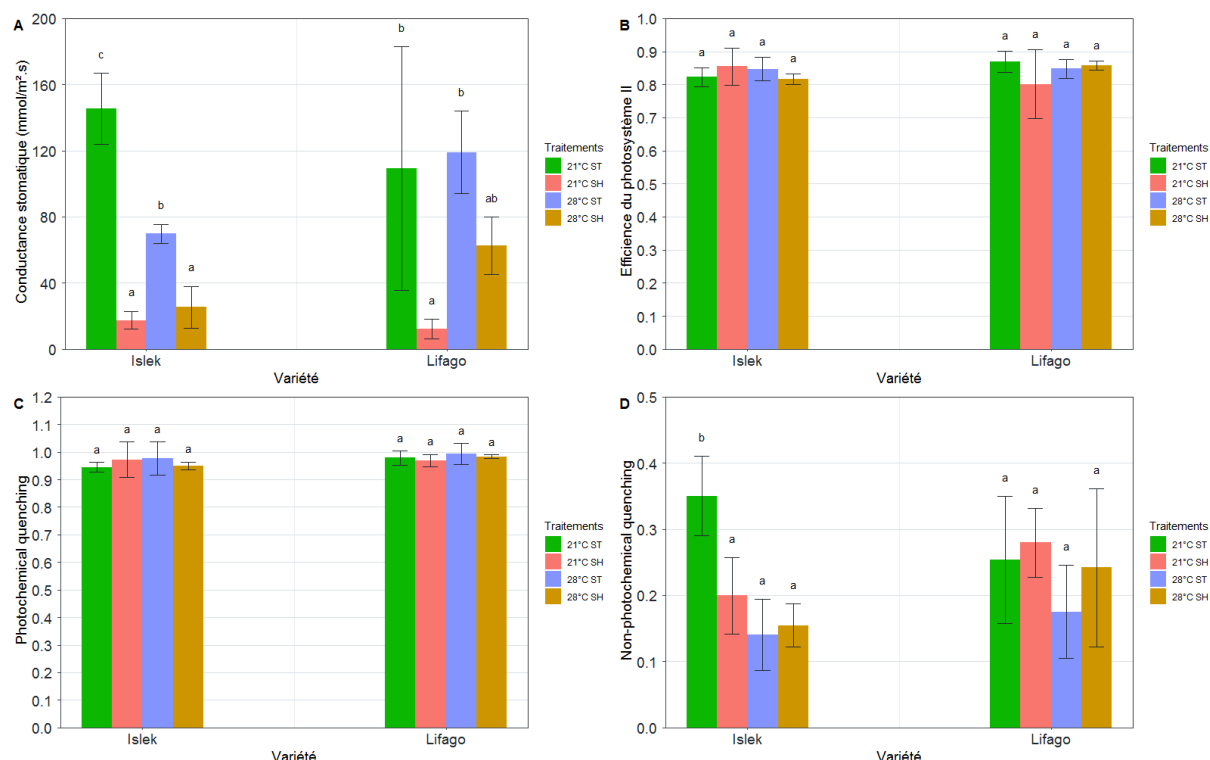


Figure 3.2 : Conductance stomatique (A) et paramètres liés à la phase photochimique de la photosynthèse (B, C, D) chez deux variétés de sarrasin de Tartarie cultivées à 21°C ou 28°C en condition témoin (ST) ou de stress hydrique (SH). (A) Conductance stomatique, (B) Efficience du photosystème II, (C) Part d'énergie allouée à la photosynthèse, (D) Part d'énergie non allouée à la photosynthèse. Les traitements partageant une même lettre pour une même variété ne sont pas significativement différents à un seuil de 5%.

Nous pouvons observer que la conductance stomatique et les trois paramètres de la photosynthèse n'étaient pas différents entre les deux variétés (Fig 3.2, Annexe 5). Les stress thermique et hydrique n'ont eu aucun effet sur l'efficience du photosystème et la part d'énergie allouée à la photosynthèse chez les deux variétés (Fig 3.2 A, B, C, Annexe 5). La conductance stomatique et la part d'énergie non allouée à la photosynthèse ont diminué de 2,5 fois avec le stress thermique chez les plantes Islek témoins (Fig 3.2, Annexe 5).

Le stress hydrique a diminué la conductance stomatique de 8,6 fois chez les plantes à 21°C et de 2,4 fois environ chez les plantes à 28°C pour les deux variétés (Fig 3.2, Annexe 5). La part d'énergie non allouée à la photosynthèse a diminué de 1,7 fois chez Islek à 21°C avec le stress hydrique mais n'a pas été modifiée chez Lifago.

### 3.3 Potentiel osmotique

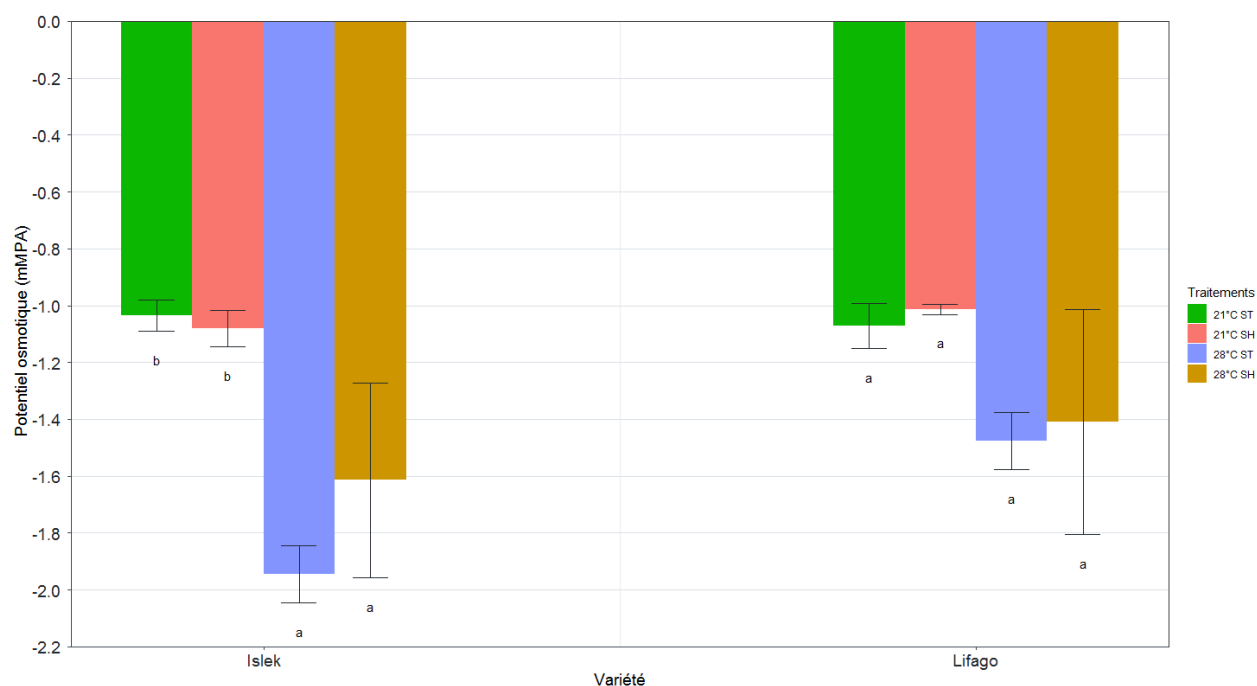


Figure 3.4 : Potentiel osmotique chez deux variétés de sarrasin de Tartarie cultivées à 21°C ou 28°C en condition témoin (ST) ou de stress hydrique (SH). Les traitements partageant une même lettre pour une même variété ne sont pas significativement différents au seuil de 5%.

Nous pouvons constater que le potentiel osmotique était quelque peu différent entre les deux variétés (Figure 3.4, Annexe 5). Le stress hydrique n'a eu aucun effet sur le potentiel osmotique chez les deux variétés (Figure 3.4, Annexe 5). Le stress thermique n'a de même pas eu d'impact chez Lifago tandis qu'il a diminué le potentiel osmotique de 1,6 fois environ chez Islek (Figure 3.4, Annexe 5).

### 3.4 MDA

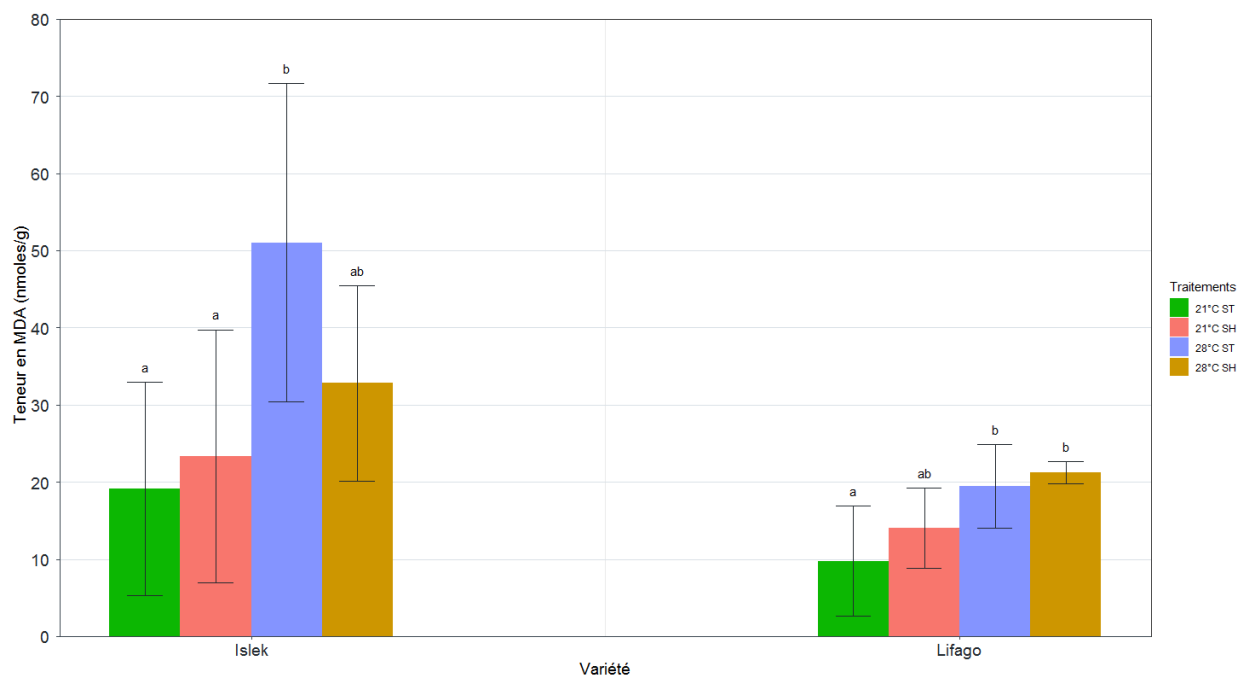


Figure 3.5 : Teneur en malondialdéhyde (MDA) chez deux variétés de sarrasin de Tartarie cultivées à 21°C ou 28°C en condition témoin (ST) ou de stress hydrique (SH). Les traitements partageant une même lettre pour une même variété ne sont pas significativement différents au seuil de 5%.

Nous pouvons examiner que la teneur en MDA était différente entre les deux variétés (Figure 3.5, Annexe 5). Elle était en effet plus importante chez Islek que chez Lifago. Le stress hydrique n'a eu aucun effet sur la teneur en MDA chez les deux variétés (Figure 3.5, Annexe 5). Le stress thermique a augmenté la teneur en MDA d'environ 2,3 fois chez les plantes témoins des deux variétés (Figure 3.5, Annexe 5).

## 4. Graines

### 4.1 Nombre de graines

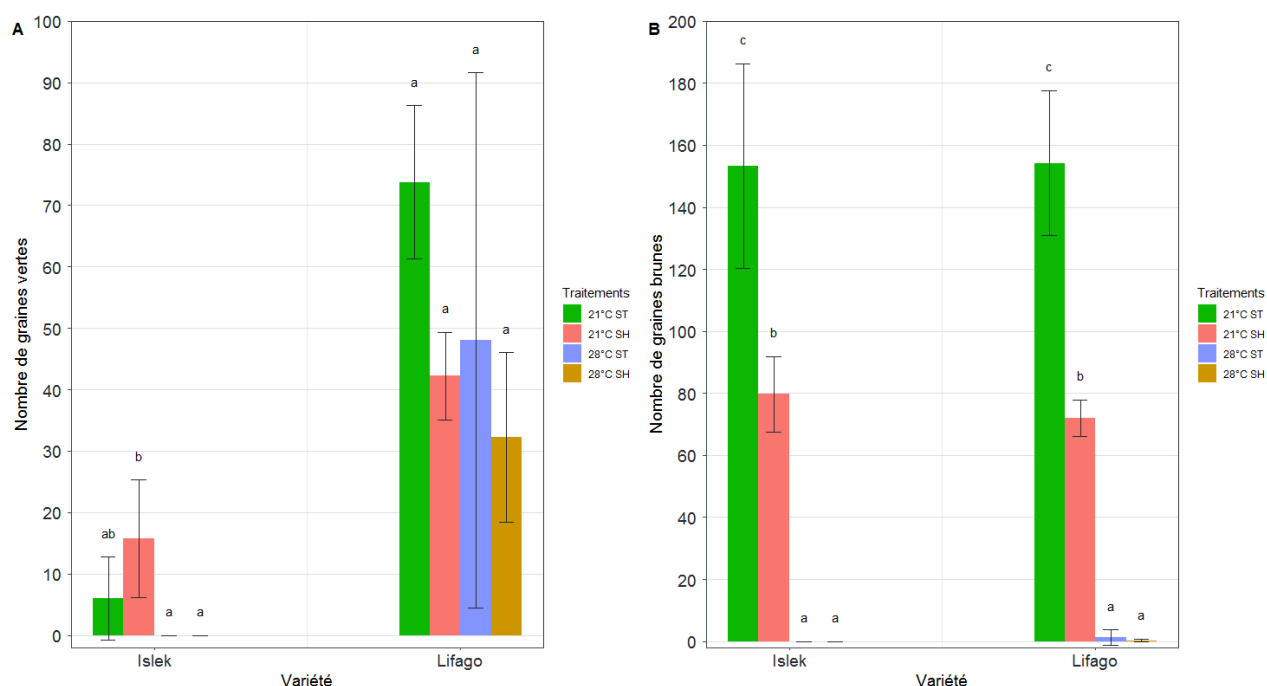


Figure 4.1 : Nombre de graines chez deux variétés de sarrasin de Tartarie cultivées à 21°C ou 28°C en condition témoin (ST) ou de stress hydrique (SH). (A) Graines vertes, (B) Graines brunes. Les traitements partageant une même lettre pour une même variété ne sont pas significativement différents au seuil de 5%.

On peut analyser qu'il y a plus de graines brunes matures que de graines vertes en formation à 21°C, quelle que soit la variété.

Concernant les graines vertes, leur nombre était différent entre les deux variétés (Fig 4.1 A, Annexe 5). Le stress hydrique n'a eu aucun effet sur le nombre de graines vertes chez les deux variétés (Fig 4.1 A, Annexe 5). Le stress thermique n'a de même pas eu d'impact chez Lifago tandis qu'il a entraîné la non-production de graines chez Islek (Fig 4.1 A, Annexe 5). Lifago a produit environ 4 fois plus de graines vertes qu'Islek.

Concernant les graines brunes, on remarque qu'il n'y aucune différence entre les deux variétés (Fig 4.1 B, Annexe 5). Le stress hydrique a diminué de moitié le nombre de graines brunes à 21°C chez les deux variétés (Fig 4.1 B, Annexe 5). Le stress thermique a fortement diminué le nombre de graines brunes chez les deux variétés voire en a empêché la production chez les plantes Islek (Fig 4.1 B, Annexe 5).

## 4.2 Poids de 1000 grains

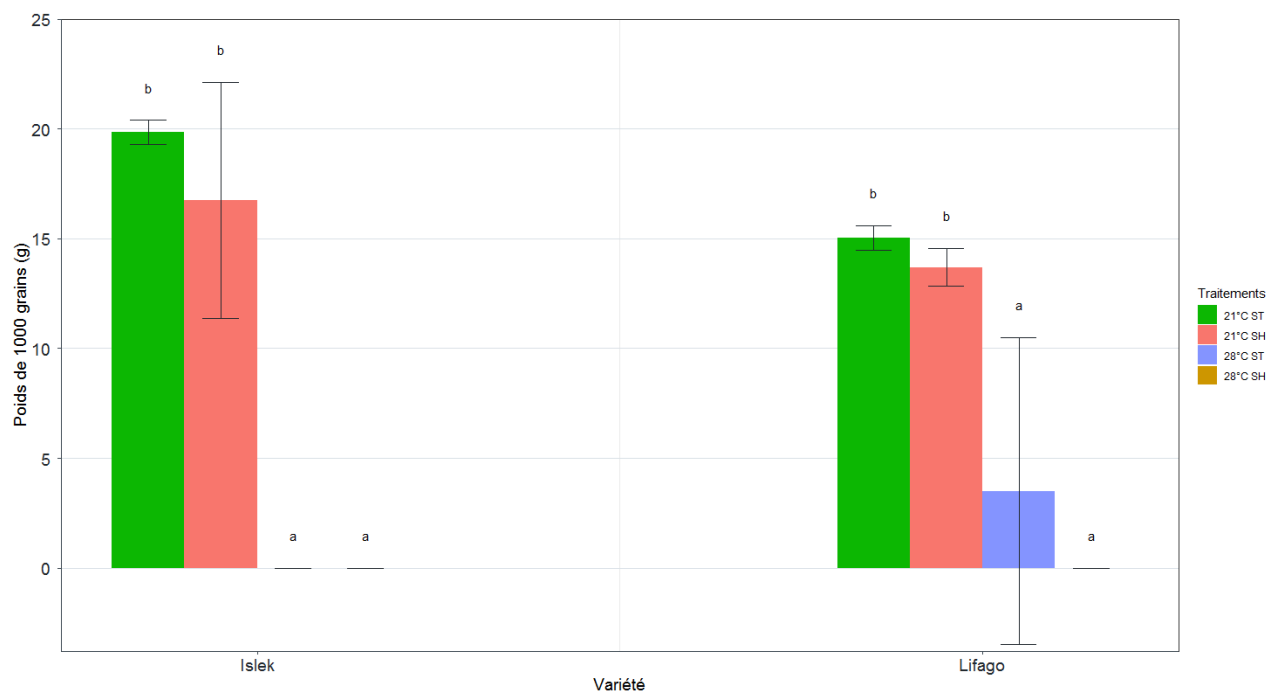


Figure 4.2 : Poids de 1000 grains chez deux variétés de sarrasin de Tartarie cultivées à 21°C ou 28°C en condition témoin (ST) ou de stress hydrique (SH). Les traitements partageant une même lettre pour une même variété ne sont pas significativement différents au seuil de 5%.

Le poids de 1000 grains n'était pas différent entre les deux variétés (Fig 4.2, Annexe 5). Le stress hydrique n'a eu aucun effet sur le poids de 1000 grains chez les deux variétés (Fig 4.2, Annexe 5). Celui-ci est inexistant à cause du stress thermique chez Islek. Chez Lifago, le stress thermique a diminué/inhibé le poids de 1000 grains des plantes. Seulement une graine a été produite en stress hydrique à 28°C donc on ne peut considérer qu'il y a eu un poids de 1000 grains.

### 4.3 Minéraux

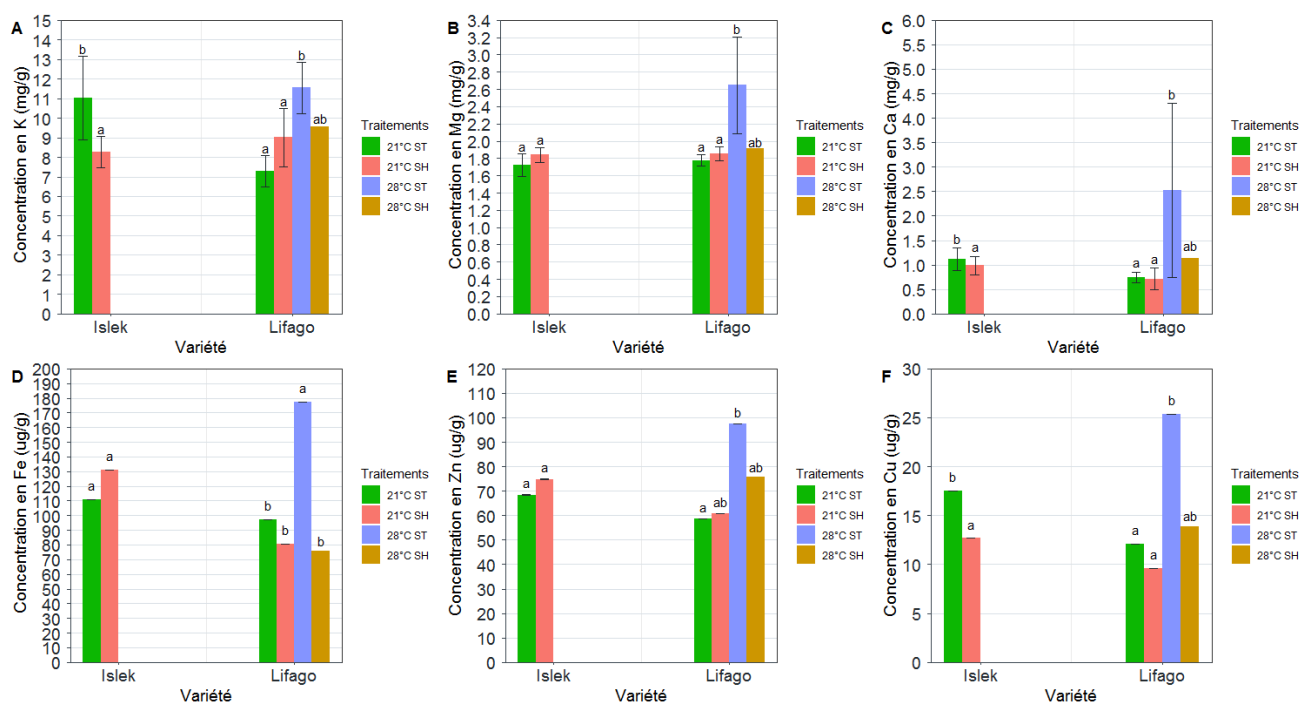


Figure 4.3 : Concentrations en minéraux dans les graines de deux variétés de sarrasin de Tartarie cultivées à 21°C ou 28°C en condition témoin (ST) ou de stress hydrique (SH). (A) Teneur en K, (B) Teneur en Mg, (C) Teneur en Ca, (D) Teneur en Fe, (E) Teneur en Zn, (F) Teneur en Cu. Les traitements partageant une même lettre pour une même variété ne sont pas significativement différents au seuil de 5%.

Les concentrations en potassium, calcium, fer, zinc et cuivre différaient entre les deux variétés tandis que ce n'était pas le cas pour la concentration en magnésium (Fig 4.3, Annexe 5).

Le stress thermique a augmenté les concentrations de tous les minéraux étudiés chez les graines Lifago témoins (Fig 4.3, Annexe 5).

Le stress hydrique n'a eu aucun effet sur les concentrations en calcium et zinc chez les deux variétés (Fig 4.3 B, E, Annexe 5).

La concentration en K a diminué avec le stress hydrique chez Islek tandis qu'il n'a pas eu d'effet chez Lifago (Fig 4.3 A, Annexe 5).

Le stress hydrique n'a eu aucun effet sur les concentrations en Mg et Fe dans les graines Islek tandis que ces mêmes concentrations ont été diminuées dans les graines Lifago à 28°C (Fig 4.3 B, D, Annexe 5). Les graines Islek et Lifago à 28°C ont eu une concentration en Cu réduite en réponse au stress hydrique (Fig 4.3 F, Annexe 5).

## 5. Polyphénols et flavonoïdes

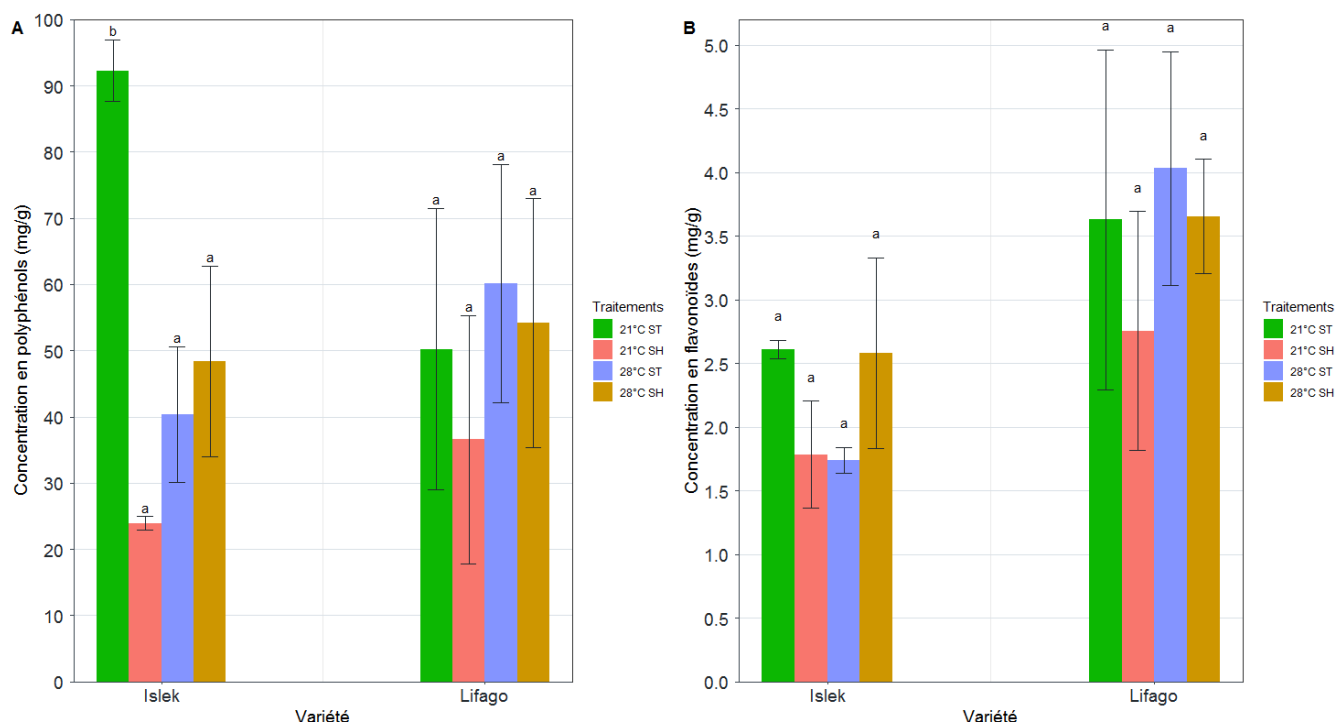


Figure 5 : Concentrations en antioxydants dans les inflorescences de deux variétés de sarrasin de Tartarie cultivées à 21°C ou 28°C en condition témoin (ST) ou de stress hydrique (SH). (A) Teneur en polyphénols, (B) Teneur en flavonoïdes. Les traitements partageant une même lettre pour une même variété ne sont pas significativement différents au seuil de 5%.

La concentration en polyphénols ne différait pas globalement entre les deux variétés, sauf pour la condition témoin à 21°C où Islek avait une valeur 1,8 fois plus élevée que Lifago (Fig 4.4 A, Annexe 5). Le stress thermique a diminué significativement de plus de la moitié la concentration en polyphénols chez les inflorescences Islek témoins mais l'a aussi augmenté sans que cela soit significatif chez les stressées et chez Lifago. La concentration en polyphénols dans les inflorescences Islek à 21°C a diminué de 3,8 fois avec le stress hydrique et celui-ci a également quelque peu diminué la concentration chez Lifago (Fig 4.4 A, Annexe 5).

Concernant la concentration en flavonoïdes, elle différait entre les deux variétés (Fig 4.4 B, Annexe 5). Elle était 1,2 fois plus élevée chez Lifago que chez Islek en moyenne et 1,5 fois plus élevée pour les témoins à 28°C. Les stress hydrique et thermique n'ont eu aucun effet chez les deux variétés (Fig 4.4 B, Annexe 5).

## IV- Discussion

### 1. Différence de croissance entre les 2 variétés

Les résultats de croissance nous ont permis de mettre en évidence que la variété Islek a produit un nombre limité de feuilles et d'inflorescences en association d'une petite taille, tout ceci établi en seulement 1 mois. Au contraire, Lifago a réalisé une croissance progressive jusqu'à la fin de la culture, avec un nombre élevé de feuilles et d'inflorescences et une taille quatre fois plus grande qu'Islek. Ces constatations font écho à une étude comparant différentes variétés de sarrasin de Tartarie dans laquelle Islek se démarque des autres variétés tant par sa production des plus petites plantes que par celle du plus petit nombre de feuilles et d'inflorescences (Aubert et Quinet, 2022).

L'étude d'Aubert et Quinet (2022) souligne également que le développement de la variété Islek a été accéléré en comparaison des autres variétés comme Lifago et qu'il s'agit de la première variété à avoir fleuri. Cela rejoint ainsi nos observations de durée de croissance et d'apparition d'inflorescences fortement différentes entre Islek et Lifago.

Une autre étude réalisée en champ avec les variétés Islek et Zlata a abouti aux mêmes conclusions quant à la plus petite taille et la production inférieure de feuilles et d'inflorescences chez Islek, par contre son rendement restait assez bon en comparaison de la variété Zlata (2481 kg/ha vs. 2963 kg/ha) par rapport à la différence de croissance (Aubert et Quinet, 2021b).

Un rythme d'initiation foliaire plus rapide chez Islek que Zlata a aussi pu être observé dans deux mémoires précédents (Aubert, 2019 ; Sia, 2020).

La variété Islek pourrait donc s'avérer intéressante pour une culture de courte durée tandis que la variété Lifago sera à privilégier pour maximiser la production de graines.

### 2. Effet des stress thermique et hydrique sur la croissance

Tout d'abord, nous avons pu observer que le stress thermique n'a induit aucun changement sur la hauteur des plantes chez les deux variétés. Cela est contradictoire avec le mémoire de Sia (2020) où Islek avait diminué sa taille en réponse au stress thermique, ainsi qu'avec l'étude d'Aubert et Quinet (2022) où le stress thermique avait diminué la taille des variétés Islek et Lifago. Cependant, nos résultats concordent avec cette même étude d'Aubert et Quinet (2022) par rapport aux variétés PI481656, PI427239 et PI481670 en condition témoin

qui n'ont pas eu de modification de taille avec le stress thermique. Le nombre de feuilles et d'inflorescences a augmenté en réponse au stress thermique chez les deux variétés ce qui a aussi été obtenu dans l'étude d'Aubert et Quinet (2020) pour la variété Zlata et le mémoire d'Aubert (2019) pour les feuilles d'Islek. Cela ne rejoint par contre que partiellement l'étude d'Aubert et Quinet (2022) puisque nos plantes témoins à 28°C ont bien produit le plus de feuilles et d'inflorescences. Néanmoins, aucune modification du nombre de feuilles chez Islek n'a été observé dans leur étude et le plus petit nombre d'inflorescences a été produit en stress hydrique à 28°C tandis qu'il s'agit de la condition stress hydrique à 21°C dans notre cas. L'augmentation de la production foliaire avec la température peut être expliquée soit par une accélération générale de la croissance de la plante, soit par une augmentation de la surface foliaire dans le but de diminuer la température de la plante grâce à l'augmentation de la transpiration (Prasad et al., 2008).

Le stress thermique a augmenté le nombre de ramifications seulement chez Islek ce qui se retrouve partiellement dans l'étude d'Aubert et Quinet (2022) dans laquelle la variété Lifago n'a pas été affectée par le stress thermique. Ce dernier a toutefois augmenté le nombre de ramifications chez les plantes Islek non stressées hydriquement tandis que l'augmentation touche les plantes en stress hydrique dans notre culture. Le stress thermique a augmenté le nombre de feuilles et d'inflorescences par ramification chez Lifago mais n'a pas eu d'effet sur ce paramètre chez Islek. Une stimulation du développement des ramifications a été observé chez d'autres espèces en réponse au stress thermique comme par exemple la bourrache (*Borago officinalis*) ou la chicorée (*Cichorium intybus*) et peut être expliquée par une perte de dominance apicale (Descamps et al., 2018 ; Mathieu et al., 2014).

Au niveau des poids, le stress thermique a augmenté le poids sec des feuilles et des inflorescences, ce qui est cohérent avec l'augmentation du nombre de feuilles et d'inflorescences mentionné plus haut. Par contre, ce résultat est contradictoire avec les études antérieures sur le sarrasin qui n'avaient pas vu d'effets pour le poids sec des feuilles (Aubert et Quinet 2020, Aubert 2019, Sia 2020) ou qui ont montré un poids sec des feuilles plus important à 28°C sans stress hydrique (Aubert et Quinet, 2022) au contraire de nos résultats où les poids les plus importants étaient observés à 28°C sous stress hydrique. Au niveau des inflorescences, nos résultats concordent avec les observations d'Aubert et Quinet (2020) et le mémoire d'Aubert (2019) pour les variétés Islek et Zlata mais non avec le mémoire de Sia (2020) où aucun effet n'avait été décelé pour ces mêmes variétés. Il n'est pas exclu que suivant les répétitions et les périodes de l'année où sont réalisées les expériences en serres, un

effet puisse être ou non significatif au vu du petit nombre de réplicats (mesure faite sur 3 plantes pour les poids) ou que les variations de conditions soient plus importantes à certaines périodes qu'à d'autres (par exemple le stress thermique est sans doute plus marqué en serres en été qu'en hiver). Si la croissance des plantes a été stimulée par le stress thermique dans notre étude, les hautes températures ont eu tendance à plutôt diminuer la teneur en eau des feuilles, des inflorescences et des tiges. Ces résultats corroborent certaines observations précédentes sur Zlata (Aubert et Quinet 2020) mais en contredisent d'autres comme par exemple l'augmentation détectée chez Islek dans le mémoire d'Aubert (2019). Il est connu que les plantes en stress thermique ouvrent leurs stomates pour limiter la température de la plante par évapotranspiration (Prasad et al., 2008) mais ce faisant, elles perdent de l'eau, ce qui peut expliquer la faible diminution de la teneur en eau observée dans cette expérience.

Globalement, le stress hydrique a réduit la croissance des plantes dans notre étude. Il a fortement diminué la taille des plantes mais uniquement chez Lifago, ce qui concorde avec les résultats d'Aubert et Quinet (2022) où les plantes stressées à 28°C avaient la plus petite taille. Cependant, nos résultats diffèrent de ceux du mémoire de Sia (2020) où la taille de la variété Islek avait aussi diminué avec le stress hydrique. Par ailleurs, le nombre de feuilles a été réduit avec le stress hydrique chez les deux variétés, confirmant le mémoire de Sia (2020) au sujet d'Islek. Aubert et Quinet (2022) n'ont cependant observé une réduction du nombre de feuilles avec le stress hydrique que chez les plantes Lifago cultivées à 21°C et aucune diminution du nombre de feuilles chez Islek. Ces différences entre études peuvent être expliquées par des différences de conditions environnementales en serres et d'autres facteurs peuvent donc avoir influencé la croissance des plantes. Le stress hydrique a aussi diminué le nombre d'inflorescences chez les deux variétés dans notre étude, confirmant les résultats d'Aubert et Quinet (2021a) et de Sia (2020) pour la variété Islek et ceux observés à 28°C par Aubert et Quinet (2022). La réduction de croissance due au stress hydrique observée dans notre étude constitue un mécanisme commun dans le but de modérer la perte en eau ainsi que les dommages causés par la sécheresse (Cornic et Massacci, 1996 ; Prasad et al., 2008).

Au contraire du stress thermique, le stress hydrique n'a affecté le nombre de ramifications chez aucune des deux variétés dans notre étude. Ceci corrobore les résultats observés pour Lifago dans l'étude d'Aubert et Quinet (2022). Par contre, le stress hydrique a réduit le nombre d'inflorescences par ramification chez les deux variétés, tout comme sur la tige principale. Une réduction de la production d'inflorescences et de fleurs est souvent observée

en cas de stress hydrique (Descamps et al., 2021), ce qui aura un impact sur le nombre de graines et le rendement.

Dans leur ensemble, les poids des différents organes n'ont pas été affectés par le stress hydrique dans notre étude mais l'effet dépendait de la température. Le poids sec des feuilles a augmenté avec le stress hydrique uniquement pour les plantes Islek à 28°C, ce qui n'est pas le cas chez Sia (2020). Dans l'étude d'Aubert et Quinet (2022), même si cela s'est produit également à 28°C, une diminution du poids sec chez Islek et Lifago a au contraire été observée. En effet, le stress hydrique a plutôt tendance à diminuer le poids des plantes comme par exemple chez la pomme de terre (Albiski et al., 2012) ou la sarriette (Baher et al., 2002). Il n'est donc pas exclu que dans nos conditions, le stress n'était pas assez intense pour observer une telle réduction. Cependant, la teneur en eau des feuilles a plutôt eu tendance à diminuer avec le stress hydrique dans notre expérience, du moins chez Islek. Ceci diffère des observations d'Aubert et Quinet (2021a) où la teneur en eau restait stable malgré un stress hydrique. Au contraire des feuilles, le stress hydrique n'a affecté le poids sec et la teneur en eau des inflorescences chez aucune des deux variétés, corroborant les résultats pour Islek du mémoire de Sia (2020). Le stress hydrique a diminué chez Islek le poids sec des tiges à 21°C mais l'a augmenté à 28°C. Ces résultats ne confirment qu'en petite partie ceux observés chez Aubert et Quinet (2022) puisque le stress hydrique a bien diminué le poids sec des tiges à 21°C chez Islek mais aussi chez Lifago et ceci de la même manière à 28°C pour les deux variétés. Le stress hydrique n'a pas affecté la teneur en eau des tiges ce qui rejoint l'étude d'Aubert et Quinet (2021a).

La combinaison des stress thermique et hydrique a affecté différemment les deux variétés. Le stress combiné n'a engendré aucun impact sur le nombre de feuilles, d'inflorescences et la taille chez Islek, ce qui a également été observé par Aubert et Quinet (2022) pour le nombre de feuilles bien que le nombre d'inflorescences et la taille de cette variété a diminué avec le stress combiné dans leur étude. Nos résultats sont aussi cohérents avec ceux obtenus en fin de culture dans le mémoire de Sia (2020). Cela suggère qu'Islek, grâce à ses paramètres de croissance plus petits que les autres variétés, a été moins affecté par les stress. Chez Lifago, les deux stress ont eu un effet négatif supplémentaire sur la taille des plantes ce qui est aussi observé chez Aubert et Quinet (2022).

Les stress thermique et hydrique cumulés ont augmenté le poids sec des feuilles, des inflorescences et des tiges (uniquement chez Lifago) par rapport aux plantes non stressées à

21°C suite à l'augmentation de croissance due au stress thermique et au développement des ramifications. Dans Aubert et Quinet (2022) et le mémoire de Sia (2020), le poids sec des feuilles n'a pas été modifié avec la combinaison des deux stress par rapport aux plantes témoins chez les deux variétés. De façon similaire, dans le mémoire de Sia (2022), le poids sec des inflorescences et des tiges n'ont pas été modifiés par les deux stress chez Islek, par contre, le poids sec des tiges a diminué chez les deux variétés dans Aubert et Quinet (2022). De même, nos résultats de teneur en eau ne sont pas pleinement en accord avec les résultats antérieurs. La teneur en eau des feuilles a diminué en réponse aux stress thermique et hydrique couplés chez les deux variétés et celle des tiges chez Lifago, ce qui est partiellement en désaccord avec le mémoire de Sia (2020) puisque la teneur en eau des feuilles et des tiges n'a pas été modifiée chez Islek. Par contre, l'union des stress thermique et hydrique n'ont pas eu d'impact sur la teneur en eau des inflorescences, confirmant les observations de Sia (2020). De nouveau, des différences sont observées entre cultures et peuvent être dues à de légères différences de conditions environnementales, d'où la nécessité de répéter les expériences dans plusieurs conditions.

Généralement, on remarque que l'association des stress thermique et hydrique a engendré un impact plus marqué que lorsqu'ils étaient séparés. Leur effet était négatif, malgré le poids sec en hausse puisque la teneur en eau est finalement réduite. Enfin, les deux variétés ont des morphologies distinctes et, dans l'ensemble, des réactions opposées face aux stress, ce qui a aussi été mis en évidence dans l'étude d'Aubert et Quinet (2022).

### 3. Effet des stress thermique et hydrique sur la physiologie

Le stress thermique a augmenté la teneur en chlorophylle et en azote, confirmant les observations précédentes pour le sarrasin de Tartarie et le sarrasin commun (Aubert et Quinet 2022, Aubert 2019, Sia 2020, De Boës 2022). Cette augmentation peut être due soit à une augmentation de la synthèse de chlorophylle, soit à un effet de concentration dû à des cellules plus petites. Nous n'avons pas mesuré ce paramètre dans ce mémoire mais Aubert et Quinet (2022) ont montré que le stress thermique diminuait la surface foliaire chez le sarrasin de Tartarie, ce qui serait en faveur de la seconde hypothèse. Même si les teneurs en chlorophylle ont été modifiées, aucun changement n'a été perçu pour l'efficacité du photosystème II et la part d'énergie allouée à la photosynthèse avec le stress thermique chez les deux variétés,

confirmant les résultats obtenus dans le mémoire d'Aubert (2019) et l'étude d'Aubert et Quinet (2022). Seul le non-photochemical quenching a diminué avec le stress thermique chez Islek au contraire des études d'Aubert (2019) et d'Aubert et Quinet (2022) mais ce paramètre n'a pas été affecté chez la variété Lifago. La phase claire de la photosynthèse semble donc globalement peu impactée par le stress thermique chez le sarrasin de Tartarie.

Au niveau des échanges gazeux, la conductance stomatique a diminué avec le stress thermique chez Islek comme observé précédemment par Aubert et Quinet (2022) et Sia (2020) mais ce qui contredit les observations d'Aubert et Quinet (2020) et Aubert (2019). Aubert et Quinet (2022) ont également trouvé que la conductance stomatique augmentait avec la hausse de température chez Lifago en l'absence de stress hydrique, tandis que notre étude n'a pas trouvé d'effet. Ces réponses contradictoires pourraient être expliquées par le fait que les mesures n'ont pas toujours été prises au même moment du stress et/ou à la même intensité de stress. En effet, les données de conductance stomatique qu'elles soient prises avec le poromètre ou l'IRGA sont ponctuelles et instantanées tandis que la réponse des stomates au stress thermique peut évoluer avec le temps. En réponse à un stress hydrique, les plantes ont tendance à ouvrir leurs stomates pour réduire la température foliaire mais augmenter la transpiration peut induire un stress hydrique et dans ce cas les plantes ferment leurs stomates (Prasad et al., 2008).

En accord avec la diminution de conductance stomatique et de teneur en eau, le potentiel osmotique a diminué avec le stress thermique chez Islek, suggérant qu'il y a eu un stress hydrique, ce qui n'a pas été mis en évidence dans le mémoire de De Boës (2022) pour une expérience similaire sur le sarrasin commun. Il semblerait qu'Islek a eu des difficultés à garder l'eau à l'intérieur de ses tissus. Cette diminution de potentiel osmotique a également été observée chez la variété Lifago. Il serait intéressant de mesurer les concentrations en osmolytes afin de voir dans quelle mesure les plantes ont mis en place un ajustement osmotique et quels sont les principaux contributeurs à cet ajustement.

La teneur en MDA a augmenté avec le stress thermique chez les deux variétés, soutenant les résultats d'Aubert et Quinet (2020). La présence de malondialdéhyde signale une peroxydation des membranes cellulaires causée par les espèces réactives d'oxygène (ROS) et constitue donc un indicateur de stress oxydatif (Bita et Gerats, 2013 ; Hasanuzzaman et al., 2013 ; Liu et Huang, 2000). Il est assez commun de voir un stress oxydatif en réponse à un stress thermique (Inze et Van Montagu, 1995 ; Munjal, 2019) et il serait intéressant d'étudier

la production d'antioxydants pour voir comment la plante gère ce stress oxydatif. Le sarrasin est connu pour sa production d'antioxydants, principalement de polyphénols et Aubert et al. (2020) ont montré que le stress thermique augmentait la capacité antioxydante et la concentration en polyphénols et en flavonoïdes dans les feuilles du sarrasin de Tartarie.

Tout comme le stress thermique, le stress hydrique a augmenté la teneur en chlorophylle chez Islek, confirmant l'augmentation décelée par Aubert et Quinet (2021a) et Sia (2020). Aubert et Quinet (2022) montrent également une augmentation de la teneur en chlorophylle avec le stress hydrique chez Lifago, ce qui était moins marqué dans notre étude. La teneur en azote a augmenté avec le stress hydrique chez Islek surtout à 28°C, ce que De Boës (2022) a aussi décelé à 26°C chez deux variétés de sarrasin commun lors de sa deuxième mesure.

La conductance stomatique a diminué à 21°C chez les deux variétés et à 28°C chez Islek avec le stress hydrique, ce qui a aussi été observé pour Islek dans le mémoire de Sia (2020) et l'étude d'Aubert et Quinet (2022). Par contre, aucun effet du stress hydrique n'a été constaté sur ce paramètre à 21°C chez Aubert et Quinet (2022) et Aubert et Quinet (2021a). La baisse de conductance stomatique peut être mise en lien avec la fermeture des stomates qui est une des premières réponses des plantes face à un stress hydrique (Buckley, 2019 ; Flexas et Medrano, 2002 ; Pirasteh-Anosheh et al., 2016). Au niveau de la phase claire de la photosynthèse, le stress hydrique n'a eu aucun effet sur les paramètres de l'efficacité du photosystème II et la part d'énergie allouée à la photosynthèse chez les deux variétés tandis qu'il a diminué le non-photochemical quenching chez Islek à 21°C, n'étant que partiellement en accord avec les études d'Aubert et Quinet (2021a ; 2022) puisque le stress hydrique n'a eu aucun impact sur ces 3 paramètres de la photosynthèse chez le sarrasin de Tartarie. Nous n'observons pas non plus de stress oxydatif étant donné que la teneur en MDA n'a pas été modifiée par le stress hydrique chez les deux variétés. Des perturbations durant la phase claire de la photosynthèse induisent généralement un stress oxydatif (Smirnoff, 1993).

Le potentiel osmotique n'a pas été affecté par le stress hydrique chez les deux variétés, ce qui a également été identifié chez le sarrasin commun dans le mémoire de De Boës (2022), supposant que l'eau fut maintenue dans les feuilles des plantes. Il s'agit d'une réponse atypique puisque beaucoup de plantes diminuent leur potentiel osmotique en cas de stress hydrique grâce à un ajustement osmotique (Hopkins, 2003). Une explication possible serait que la plante est parvenue à maintenir l'eau dans ses tissus. Cela est consolidé par l'augmentation de la teneur en eau dans les feuilles et par la diminution de la conductance

stomatique en réponse au stress hydrique. La fermeture des stomates a ainsi joué un rôle important contre la dessiccation. Dans notre étude, la transpiration foliaire n'a malheureusement pas pu être mesurée ce qui aurait permis de garantir notre explication si elle avait diminué. Cependant, la diminution de la conductance stomatique peut donner une indication sur la transpiration.

La combinaison des stress thermique et hydrique a fortement augmenté, plus que les stress individuels, la teneur en chlorophylle chez Islek, ce qui a aussi été observé par Aubert et Quinet (2022) et Sia (2020). Il s'agit du même constat pour la teneur en azote chez les deux variétés, ce qui est homologue aux résultats trouvés chez la variété Siva du sarrasin commun par De Boës (2022). Cette augmentation n'a par contre pas été mise en évidence chez Lifago dans notre étude. On peut de nouveau s'attendre à un effet de concentration étant donné qu'Aubert et Quinet (2022) ont montré que la surface foliaire était plus réduite par les stress combinés que par le stress thermique seul mais il faudrait regarder la taille des cellules au niveau histologique pour confirmer cette hypothèse. Au niveau de la phase claire de la photosynthèse, l'interaction des stress a diminué la part d'énergie non allouée à la photosynthèse chez Islek, autant que les deux stress individuels, ce qui est partiellement en désaccord avec Aubert et Quinet (2022) car aucun effet n'a été retrouvé chez Islek et Lifago dans cette étude.

La conductance stomatique a diminué avec les deux stress chez Islek, autant que le stress hydrique seul, ce qui est aussi le cas dans l'étude d'Aubert et Quinet (2022) et le mémoire de Sia (2020), suggérant que le stress hydrique a plus d'impact que le stress thermique sur ce paramètre chez cette variété. Au contraire, la conductance stomatique a eu tendance à augmenter avec le stress combiné chez Lifago, suggérant comme expliqué plus haut un compromis entre fermeture des stomates (pour éviter une perte en eau) et ouverture des stomates (pour diminuer la température foliaire) selon les plantes. La réduction du potentiel osmotique était similaire pour le stress thermique seul et pour la combinaison des stress, n'étayant pas l'analyse de De Boës (2022) qui a discerné une diminution plus importante avec le double stress chez le sarrasin commun. Ceci suggère que le stress hydrique n'était pas particulièrement marqué chez les plantes en stress combiné par rapport aux plantes en stress thermique seul bien que l'arrosage ait été plus important pour ce dernier traitement. De même le stress oxydatif (teneur en MDA) n'était pas plus important pour le stress combiné que pour le stress thermique seul.

Globalement, on remarque que séparés ou associés, les stress thermique et hydrique ont engendré un impact similaire. Enfin, il est difficile de conclure quant à la différence ou la similitude des réactions physiologiques entre les deux variétés car, parfois, lorsque l'une était affectée par un stress, l'autre ne l'était pas ou encore les deux étaient impactées ou non. Le double stress a cependant eu un effet additionnel sur les teneurs en chlorophylle et en azote ce qui rejoint l'étude d'Aubert et Quinet (2022).

Différents mécanismes lient la croissance et la physiologie des plantes. Islek et Lifago ont augmenté leur nombre de feuilles avec le stress thermique afin de diminuer la température grâce, de façon hypothétique, à la transpiration. Cette dernière n'a en effet pas été évaluée dans notre étude. Cette supposition est cependant avancée au regard de la réduction de la teneur en eau chez les deux variétés. C'est au stade physiologique que les deux variétés n'ont pas été impactées de la même manière. En effet, Islek a fermé ses stomates car un déficit en eau a vraisemblablement été subi, attesté par une teneur en eau fortement diminué. Un ajustement osmotique a suivi pour contrebalancer cette fermeture. Au contraire, Lifago a été beaucoup plus résistant et n'a pas fermé ses stomates, ni réalisé un ajustement osmotique (diminution observée mais non significative) puisque sa teneur en eau a été moins réduite. Lors du stress hydrique, un nombre de feuilles moindre a été produit chez les deux variétés afin de diminuer la perte en eau. Islek a maintenu la teneur en eau dans ses feuilles et Lifago a du quelque peu l'augmenter à 21°C et diminuer à 28°C. En conséquence, une fermeture des stomates a eu lieu, permettant de ne pas faire intervenir l'ajustement osmotique.

#### 4. Effet des stress thermique et hydrique sur la production des graines

Le poids sec des graines a diminué avec le stress hydrique chez les deux variétés, infirmant l'absence d'impact soutenu dans le mémoire de Sia (2020) mais en accord avec la diminution observée pour Zlata. Le stress hydrique n'a pas eu d'effet sur la teneur en eau des graines, validant les observations de Sia (2020).

La teneur en eau des graines a diminué chez Islek tandis qu'elle a augmenté avec les stress thermique et hydrique chez Lifago, contredisant l'absence d'impact décelé dans le mémoire de Sia (2020).

Au contraire, le poids sec des graines a beaucoup diminué avec l'interaction des deux stress chez les deux variétés, ce qui n'a pas été retrouvé chez Islek dans le mémoire de Sia (2020).

Le stress thermique n'a pas eu d'impact sur la production de graines vertes chez Lifago tandis qu'il a entraîné la non-production de graines chez Islek. Il a aussi fortement diminué le nombre de graines brunes chez les deux variétés voire en a empêché la production chez les plantes Islek. Ces observations concordent avec les études précédentes : Aubert (2019) n'a pas non plus obtenu de graines vertes chez Islek en stress thermique et Aubert et Quinet (2022) n'ont obtenu aucune graine mature chez Islek et Lifago à haute température. Islek a produit tout de même quelques graines vides à haute température dans le mémoire de Sia (2020) mais aucune dans le mémoire d'Aubert (2019). Il semblerait donc que le stress thermique empêche et l'initiation du fruit (et peut-être la fécondation) et le remplissage du grain chez le sarrasin de Tartarie. En effet, le poids de 1000 grains était fortement inhibé par le stress thermique chez les deux variétés, fournissant les mêmes résultats qu'Aubert et Quinet (2022). Par contre, le stress thermique a augmenté la teneur en eau des graines de Lifago mais il devait principalement s'agir de graines vertes et la différence vient plus probablement d'une distinction du stade de maturité que d'une différence de teneur en eau. Il serait nécessaire d'étudier plus en détails la croissance des tubes polliniques, la fécondation et le développement de la graine pour voir précisément les étapes inhibées par le stress thermique.

L'effet du stress hydrique était moins néfaste sur la production de graines que l'effet du stress thermique. Le stress hydrique n'a affecté la production de graines vertes chez aucune des deux variétés. Il a par contre diminué de moitié le nombre de graines brunes à 21°C chez les deux variétés, s'approchant en partie des résultats d'Aubert et Quinet (2022) qui ont seulement trouvé une baisse chez Lifago, mais ne coïncidant pas avec les résultats de Sia (2020) et Aubert et Quinet (2021a) qui n'ont pas trouvé d'impact du stress hydrique sur le nombre de graines matures chez le sarrasin de Tartarie. Dans notre étude, le stress hydrique n'a eu aucun effet sur le poids de 1000 grains chez les deux variétés ce qui est contradictoire avec la baisse chez Lifago et la hausse chez Islek discernées chez Aubert et Quinet (2022).

Il faut émettre des précautions pour le comptage des graines puisqu'il a été réalisé après deux mois et demi de culture. Ainsi, des graines vertes en formation pouvaient encore se développer et arriver à maturation. Le cycle de production de la plante n'était alors pas terminé et différait également entre les deux variétés. On peut supposer par le plus petit nombre de graines vertes chez Islek que sa production était bientôt terminée tandis que le

cycle de Lifago était encore en cours. L'absence de différence entre Islek et Lifago pour le nombre de graines brunes pourrait ainsi être réfutée en regard des explications ci-dessus. Aubert et Quinet (2022) avait en effet constaté qu'Islek avait produit le moins de graines, avec un nombre 2 fois inférieur au nôtre et Lifago le plus de graines.

Les mêmes précautions sont à prendre pour le poids de 1000 grains pour les raisons sus-expliquées quant au comptage des graines. Le rendement ne peut pas être calculé ici car la donnée de surface est manquante mais malgré tout on peut voir qu'il n'y a pas de différence entre variétés si on prend en compte le nombre de graines et le poids de 1000 grains, comme expliqué dans l'étude d'Aubert et Quinet (2022). Elles ont en opposition reporté qu'Islek avait en effet le rendement le plus faible, se distinguant du rendement le plus élevé chez Lifago.

La combinaison des stress thermique et hydrique a eu le même impact que le stress thermique, s'accordant avec les analyses réalisées par Aubert et Quinet (2022) et Sia (2020). Il faut porter son attention sur le fait que la combinaison n'a pu être vraiment concrète que sur le nombre de graines brunes chez Lifago puisque les autres valeurs sont nulles.

Au niveau qualitatif, le stress thermique a augmenté les concentrations de tous les minéraux étudiés (K, Mg, Ca, Fe, Zn, Cu) chez les graines Lifago témoins. Comme le suggère Ben Mariem et al. (2021), le nombre de graines étant très faible à haute température chez Lifago, il y a alors un effet de concentration de tous les nutriments dans les graines plus petites. Le stress hydrique a diminué la concentration en K et Cu chez Islek mais n'a pas eu d'effet sur les concentrations des autres minéraux, confirmant les résultats du mémoire de Sia (2020). Les concentrations en Mg et Fe ont diminué chez Lifago à 28°C mais sont similaires aux concentrations à 21°C. Les mesures ont été uniquement réalisées sur une graine donc on ne peut de façon fiable déterminer l'effet du stress hydrique et celui des stress combinés.

Les teneurs en antioxydants n'ont pas pu être dosées sur les graines par manque de matériel mais ont été dosés dans les inflorescences. Le stress thermique a diminué la concentration en polyphénols dans les inflorescences Islek sans stress hydrique mais n'a pas affecté significativement les concentrations chez Lifago ni les concentrations en flavonoïdes. Ceci diffère des observations de Aubert et Quinet (2020, 2022) qui ont plutôt montré une augmentation des teneurs en polyphénols et flavonoïdes en réponse à la température dans les inflorescences du sarrasin de Tartarie. Le stress hydrique a diminué la concentration en polyphénols chez Islek à 21°C mais n'a pas significativement affecté la concentration en polyphénols chez Lifago ni la concentration en flavonoïdes. Aubert et Quinet (2022)

rapportent que les teneurs en polyphénols et flavonoïdes dans les inflorescences du sarrasin de Tartarie étaient peu impactés par le stress hydrique. Dans ce mémoire, une interaction significative entre stress hydrique et thermique a été obtenue pour les teneurs en polyphénols. En effet, le stress combiné a eu tendance à augmenter la teneur en polyphénols dans les inflorescences d'Islek tandis que le stress hydrique seul l'a diminuée. La haute teneur en polyphénols obtenue à 21°C en condition témoin pour Islek est en contradiction avec les études antérieures et mériterait vérification. Par ailleurs, il aurait été intéressant de pouvoir doser les teneurs en polyphénols et flavonoïdes dans les graines mais il faudrait plus de graines et donc plus de plantes. Aubert et al. (2021) rapportent que les graines de sarrasin de Tartarie sont plus riches en polyphénols et flavonoïdes que les graines de sarrasin commun.

## V- Conclusion

La sécurité et la stabilité alimentaires sont éminemment menacées d'un côté par le scénario climatique et de l'autre par la dépendance vis-à-vis d'un nombre limité de cultures. Néanmoins, des cultures alternatives, délaissées à cause de la mondialisation et de l'industrialisation, regagnent de l'intérêt et offrent un fabuleux potentiel de ressources et d'avantages à considérer pour résoudre nos problématiques actuelles. C'est le cas du sarrasin de Tartarie, une pseudo-céréale adaptée aux conditions difficiles et possédant une grande tolérance aux stress abiotiques, supérieure à celle du sarrasin commun déjà cultivé de façon modérée et encore bien plus que les céréales traditionnelles. Notre étude a permis d'analyser le potentiel du sarrasin de Tartarie dans le cadre du changement climatique. Une augmentation de la température et un stress hydrique ont engendré différents effets sur les plantes. Un mécanisme de résistance a été mis en place en réponse au stress thermique, constitué d'une augmentation de la production foliaire pour augmenter le taux de transpiration et ainsi réduire la température de la plante. Un mécanisme d'évitement a été induit par le stress hydrique chez les plantes puisqu'elles ont diminué leur production foliaire et fermé leurs stomates pour garder un maximum d'eau à l'intérieur de leurs tissus végétaux.

Le stress thermique a engendré plus d'impacts que le stress hydrique sur la croissance et la physiologie ainsi que sur la production et la qualité des graines, chez les deux variétés de

sarrasin de Tartarie Islek et Lifago. Seule la croissance a subi un effet plus marqué de la combinaison des stress thermique et hydrique que les stress individuels.

Si l'on compare les variétés entre elles, la croissance n'a pas été plus impactée chez l'une ou l'autre mais l'effet ne s'est pas produit sur les mêmes variables. Au niveau physiologique, Islek a été nettement plus atteinte, environ 3 fois plus globalement. Enfin, la qualité et la production des graines ont été moins affectées chez Lifago puisque Islek n'a produit aucune graine à 28°C.

Cela nous amène à énoncer que Lifago est une variété plus prometteuse pour l'avenir aussi bien pour la santé et l'alimentation humaine puisqu'elle contient plus d'antioxydants et subit moins de dommages physiologiques en cas de stress abiotiques que pour le bétail grâce à un plus grand feuillage utilisé pour le fourrage.

## VI- Perspectives

Un stress oxydatif a été observé en réponse au stress thermique chez Islek mais qui ne concorde pas avec une concentration réduite en polyphénols. Il semblerait que les plantes auraient déjà réagi ; ces observations peut-être dues à la date des récoltes des inflorescences (début et fin avril) vraisemblablement tardive. La température plus chaude entraîne en effet une augmentation du développement global des cultures, ce qui a bien été observé chez Islek, de sorte que la saison de croissance des cultures est raccourcie (Prasad et al., 2008). Le stress oxydatif s'est probablement produit ainsi plus tôt en conséquence du développement raccourci. Afin de mieux comprendre les réactions physiologiques d'Islek face au stress thermique et le déroulement de ce stress oxydatif, il serait alors judicieux de réaliser une étude ne se focalisant que sur ce mécanisme avec des récoltes de feuilles à différents moments de la culture, suivies de dosages en MDA et polyphénols.

Il serait intéressant d'étudier l'impact des stress abiotiques sur la concentration en macronutriments tels que les protéines, glucides et lipides dans les graines afin de savoir si la variété Lifago serait aussi prometteuse au niveau nutritif.

Le sarrasin de Tartarie fait malheureusement l'objet de peu d'études et n'est pas suffisamment pris en considération en raison de son rendement plus faible que les céréales traditionnelles. Une possibilité d'amélioration en profondeur consisterait à se pencher sur la mémoire de stress. Il s'agit de la capacité des plantes soumises à une exposition de stress à stocker cette information pour la réutiliser afin de mieux réagir à un stress ultérieur (De Freitas Guedes et al., 2019). Ce mécanisme implique divers changements aux niveaux physiologique, biochimique, épigénétique et moléculaire comme la méthylation de l'ADN (Arora et al., 2022 ; Hossain et al., 2018). Ceux-ci permettent d'augmenter la tolérance au stress tout au long de la vie de la plante et il a récemment été révélé qu'ils se transmettent aux générations suivantes (Sheteiwy et al., 2019). Ainsi, comme cela a été suggéré par Arora et al. (2022), les graines de sarrasin pourraient être amorcées avec des stress thermique et hydrique avant leur ensemencement pour améliorer leur tolérance et alors maintenir le rendement. Ces plantes fourniraient subséquemment un nouveau moyen de concevoir des cultures résilientes et intelligentes face au climat de demain et aux besoins croissants de la production alimentaire mondiale (Arora et al., 2022 ; Liu et al., 2021).

## Bibliographie

Abdelghani, Y. C. (2015). Impact du changement climatique sur le rendement du blé dur dans la wilaya d'Ain Defla. Mémoire de fin d'étude à l'Université Khemis Miliana en Algérie.

Abram, N. J., McGregor, H. V., Tierney, J. E., Evans, M. N., McKay, N. P., & Kaufman, D. S. (2016). Early onset of industrial-era warming across the oceans and continents. *Nature*, 536(7617), 411-418.

Ahad, B., & Reshi, Z. A. (2015). Climate change and plants. In *Crop Production and Global Environmental Issues* (pp. 553-574). Springer, Cham.

Ahmadi, A., & Baker, D. A. (2001). The effect of water stress on the activities of key regulatory enzymes of the sucrose to starch pathway in wheat. *Plant Growth Regulation*, 35(1), 81-91.

Ahmed, A., Khalid, N., Ahmad, A., Abbasi, N. A., Latif, M. S. Z., & Randhawa, M. A. (2014). Phytochemicals and biofunctional properties of buckwheat: a review. *The Journal of Agricultural Science*, 152(3), 349-369.

Albiski, F., Najla, S., Sanoubar, R., Alkabani, N., & Murshed, R. (2012). In vitro screening of potato lines for drought tolerance. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 18(4), 315-321.

Alvarez-Jubete, L., Arendt, E. K., & Gallagher, E. (2010). Nutritive value of pseudocereals and their increasing use as functional gluten-free ingredients. *Trends in Food Science & Technology*, 21(2), 106-113.

Arora, H., Singh, R. K., Sharma, S., Sharma, N., Panchal, A., Das, T., Prasad, A., Prasad, M. (2022). DNA methylation dynamics in response to abiotic and pathogen stress in plants. *Plant Cell Reports*, 1-14.

Aubert, L., Konrádová, D., Kebbas, S., Barris, S., & Quinet, M. (2020). Comparison of high temperature resistance in two buckwheat species *Fagopyrum esculentum* and *Fagopyrum tataricum*. *Journal of plant physiology*, 251, 153222.

Aubert, L., Konrádová, D., Barris, S., & Quinet, M. (2021a). Different drought resistance mechanisms between two buckwheat species *Fagopyrum esculentum* and *Fagopyrum tataricum*. *Physiologia Plantarum*, 172(2), 577-586.

Aubert, L., Decamps, C., Jacquemin, G., & Quinet, M. (2021b). Comparison of plant morphology, yield and nutritional quality of *Fagopyrum esculentum* and *Fagopyrum tataricum* grown under field conditions in Belgium. *Plants*, 10(2), 258.

Aubert, L., & Quinet, M. (2022). Comparison of Heat and Drought Stress Responses among Twelve Tartary Buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) Varieties. *Plants*, 11(11), 1517.

- Aubrecht, E., & Biacs, P. A. (2001). Characterization of buckwheat grain proteins and its products. *Acta Alimentaria*, 30(1), 71-80.
- Babu, S., Yadav, G. S., Singh, R., Avasthe, R. K., Das, A., Mohapatra, K. P., ... & Prakash, N. (2018). Production technology and multifarious uses of buckwheat (*Fagopyrum* spp.): A review. *Indian Journal of Agronomy*, 63(4), 415-427.
- Baher, Z. F., Mirza, M., Ghorbanli, M., & Bagher Rezaii, M. (2002). The influence of water stress on plant height, herbal and essential oil yield and composition in *Satureja hortensis* L. *Flavour and Fragrance Journal*, 17(4), 275-277.
- Baniya, B. K., Baidya, M. L., Sharma, D. R., Dongol, D. M. S., Paudel, I., & Bimb, H. P. (2001). Study of Nepalese Tite buckwheat landraces at diversified agro-ecological regions of Nepal. In *Proc. National Workshop Buckwheat* (pp. 157-165).
- Barber, S. A. (1995). *Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach*. John Wiley & Sons.
- 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.
- Barrett, S. C., & Cruzan, M. B. (1994). Incompatibility in heterostylous plants. In *Genetic control of self-incompatibility and reproductive development in flowering plants* (pp. 189-219). Springer, Dordrecht.
- Barrett, S. C. H., & Shore, J. S. (2008). New insights on heterostyly: comparative biology, ecology and genetics. In *Self-incompatibility in flowering plants* (pp. 3-32). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Baumgertel, A., Grimm, R., Eisenbeiß, W., & Kreis, W. (2003). Purification and characterization of a flavonol 3-O- $\beta$ -heterodisaccharidase from the dried herb of *Fagopyrum esculentum* Moench. *Phytochemistry*, 64(2), 411-418.
- Ben Mariem, S., Soba, D., Zhou, B., Loladze, I., Morales, F., & Aranjuelo, I. (2021). Climate Change, Crop Yields, and Grain Quality of C3 Cereals: A Meta-Analysis of [CO<sub>2</sub>], Temperature, and Drought Effects. *Plants*, 10(6), 1052.
- Bitá, C. E., & Gerats, T. (2013). Plant tolerance to high temperature in a changing environment: scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops. *Frontiers in plant science*, 4, 273.
- Bjorkman, T., Bellinder, R., Hahn, R. and J.W. Shail, Jr. (2008). Buckwheat Cover Crop Handbook. Cornell University Cooperative Extension.
- Bonafaccia, G., Marocchini, M., & Kreft, I. (2003a). Composition and technological properties of the flour and bran from common and tartary buckwheat. *Food chemistry*, 80(1), 9-15.

- Bonafaccia, G., Gambelli, L., Fabjan, N., & Kreft, I. (2003b). Trace elements in flour and bran from common and tartary buckwheat. *Food Chemistry*, 83(1), 1-5.
- Buckley, T. N. (2019). How do stomata respond to water status ?. *New Phytologist*, 224(1), 21-36.
- Cai, Y., Corke, H., Li, W. (2004). Buckwheat. In Wrigley, C.W., Corke, H., Walker, C.E. (2004) *Encyclopedia of Grain Science*. Vol. 1, 120–128
- Campbell, C.G. (1997). Buckwheat. *Fagopyrum esculentum* Moench. *Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops*. 19. Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research.
- Cao, Y-Y., Duan, H., Yang, L-N., Wang, Z-Q., Zhou, S-C., Yang, J-C. (2008). Effect of heat stress during meiosis on grain yield of rice cultivars differing in heat tolerance and its physiological mechanism. *Acta Agronomica Sinica*, 34(12), 2134-2142.
- Cawoy, V., Kinet, J. M., & Jacquemart, A. L. (2008). Morphology of nectaries and biology of nectar production in the distylous species *Fagopyrum esculentum*. *Annals of botany*, 102(5), 675-684.
- Cohen, I., Zandalinas, S. I., Huck, C., Fritschi, F. B., & Mittler, R. (2021). Meta-analysis of drought and heat stress combination impact on crop yield and yield components. *Physiologia Plantarum*, 171(1), 66-76.
- Cornic, G., & Massacci, A. (1996). Leaf photosynthesis under drought stress. In *Photosynthesis and the Environment* (pp. 347-366). Springer, Dordrecht.
- Craufurd, P. Q., Flower, D. J., & Peacock, J. M. (1993). Effect of heat and drought stress on sorghum. I. Panicle development and leaf appearance. *Experimental Agriculture*, 29(1), 61-76.
- Dai, A. (2013). Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature climate change*, 3(1), 52-58.
- De Boës, C., & Quinet, M. (2022). L’impact des changements climatiques sur le sarrasin commun (*Fagopyrum esculentum*) : réponse des variétés La Harpe et Siva aux stress hydrique et thermique.
- De Freitas Guedes, F. A., Menezes-Silva, P. E., DaMatta, F. M., & Alves-Ferreira, M. (2019). Using transcriptomics to assess plant stress memory. *Theor Exp Plant Phys* 31: 47–58.
- 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.
- Descamps, C., Quinet, M., & Jacquemart, A. L. (2021). The effects of drought on plant–pollinator interactions: What to expect ?. *Environmental and Experimental Botany*, 182, 104297.

Duvernoy, J. (2022). Panorama en Europe et en France des effets présents et à venir du changement climatique. In *Annales des Mines-Responsabilité et environnement* (Vol. 106, No. 2, pp. 21-26). FFE.

Edreira, J. I. R., & Otegui, M. E. (2012). Heat stress in temperate and tropical maize hybrids: Differences in crop growth, biomass partitioning and reserves use. *Field Crops Research*, 130, 87-98.

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.

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 185-212.

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 *Molecular breeding and nutritional aspects of buckwheat* (pp. 299-319). Academic Press.

Ferault, C. (1984). Une plante oubliée qui n'est pas sans avenir, le sarrasin. *Agriculture*, 490, 363-364.

Flexas, J., & Medrano, H. (2002). Drought-inhibition of photosynthesis in C3 plants: stomatal and non-stomatal limitations revisited. *Annals of botany*, 89(2), 183-189.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2005). The state of food insecurity in the world 2004. FAO.

Food and Agriculture Organization, Corporate Statistical Database (FAOSTAT). (2018a). Buckwheat production in 2016. Crops/ Regions/World list/Production Quantity (pick lists). Available on [http:// faostat.fao.org/](http://faostat.fao.org/).

Food and Agriculture Organization, Corporate Statistical Database (FAOSTAT). (2018b). Production-yield quantities of buckwheat in world + (total), 1961–2016. Available on <http://faostat.fao.org/>

Food and Agriculture Organization, Corporate Statistical Database (FAOSTAT). (2022a). Crop and Livestock Products / Buckwheat/Word + total / Production quantity/ 2014-2020. Available on <http:// faostat.fao.org/>.

Food and Agriculture Organization, Corporate Statistical Database (FAOSTAT). (2022b). Crop and Livestock Products / Buckwheat/Word + total / Production quantity/ 2017. Available on <http:// faostat.fao.org/>.

Food and Agriculture Organization, Corporate Statistical Database (FAOSTAT). (2022c). Crop and Livestock Products / Buckwheat/Word + total / Production quantity/ 2020. Available on <http:// faostat.fao.org/>.

Food and Agriculture Organization, Corporate Statistical Database (FAOSTAT). (2022d). Crop and Livestock Products / Buckwheat/ France / Yield of Buckwheat by Country. Available on [http:// faostat.fao.org/](http://faostat.fao.org/).

Gardner, W. K., & Boundy, K. A. (1983). The acquisition of phosphorus by *Lupinus albus* L. IV. The effect of interplanting wheat and white lupin on the growth and mineral composition of the two species. *Plant and Soil*, 391-402.

Gimenez-Bastida, J. A., & Zielinski, H. (2015). Buckwheat as a functional food and its effects on health. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(36), 7896-7913.

Giupponi, L., Borgonovo, G., Panseri, S., & Giorgi, A. (2019). Multidisciplinary study of a little known landrace of *Fagopyrum tataricum* Gaertn. of Valtellina (Italian Alps). *Genetic Resources and Crop Evolution*, 66(4), 783-796.

Gondola, I., & Papp, P. P. (2010). Origin, geographical distribution and phylogenetic relationships of common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench.). *The European Journal of Plant Science and Biotechnology*, 4(1), 17-32.

Hart, K., Alen, B., Keenleyside, C., Nanni, S., Maréchal, A., Paquel, K., Nesbit, M., & Ziemann, J. (2017). The consequences of climate change for EU agriculture : Followup to the COP 21 - UN Paris Climate Change Conference. Brussels, European Parliament.

Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Alam, M. M., Roychowdhury, R., & Fujita, M. (2013). Physiological, biochemical, and molecular mechanisms of heat stress tolerance in plants. *International journal of molecular sciences*, 14(5), 9643-9684.

Heath, R. L., & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of biochemistry and biophysics*, 125(1), 189-198.

Hedhly, A. (2011). Sensitivity of flowering plant gametophytes to temperature fluctuations. *Environmental and Experimental Botany*, 74, 9-16.

Herrero, A. D., Loicq, J., & Laborde, V. (2019). Study of a CubeSat dual-band infrared imager for hydric stress observation from space.

Hopkins, W. G. (2003). *Physiologie végétale*. De Boeck Supérieur.

Hossain, M. A., Li, Z. G., Hoque, T. S., Burritt, D. J., Fujita, M., & Munné-Bosch, S. (2018). Heat or cold priming-induced cross-tolerance to abiotic stresses in plants: key regulators and possible mechanisms. *Protoplasma*, 255(1), 399-412.

Huaixiang, W. (2007). An Exploration of Buckwheat Germplasm Resources in Shennongjia and the Three Gorges Area. Hubei Academy of Agricultural Sciences.

Huda, M. N., Lu, S., Jahan, T., Ding, M., Jha, R., Zhang, K., Zhang, W., Georgiev, M. I., Park, S. U., & Zhou, M. (2021). Treasure from garden: Bioactive compounds of buckwheat. *Food chemistry*, 335, 127653.

Ikeda, S., Yamashita, Y., & Kreft, I. (1999). Mineral composition of buckwheat by-products and its processing characteristics to konjak preparation. *Fagopyrum*, 16, 89-94.

Ikeda, S., Yamashita, Y., Tomura, K., & Kreft, I. (2006). Nutritional comparison in mineral characteristics between buckwheat and cereals. *Fagopyrum*, 23, 61-65.

Inze, D., & Van Montagu, M. (1995). Oxidative stress in plants. *Current opinion in Biotechnology*, 6(2), 153-158.

IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC: Geneva, Switzerland, 2014; p. 151.

IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., & Zhou, B. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Ismail, A. M., & Hall, A. E. (1999). Reproductive-stage heat tolerance, leaf membrane thermostability and plant morphology in cowpea. *Crop Science*, 39(6), 1762-1768.

Jacquemart, A. L., Cawoy, V., Kinet, J. M., Ledent, J. F., & Quinet, M. (2012). Is buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) still a valuable crop today. *The European Journal of Plant Science and Biotechnology*, 6(2), 1-10.

Jiang, P., Burczynski, F., Campbell, C., Pierce, G., Austria, J. A., & Briggs, C. J. (2007). Rutin and flavonoid contents in three buckwheat species *Fagopyrum esculentum*, *F. tataricum*, and *F. homotropicum* and their protective effects against lipid peroxidation. *Food research international*, 40(3), 356-364.

Johkan, M., Oda, M., Maruo, T., & Shinohara, Y. (2011). Crop production and global warming. *Global warming impacts-case studies on the economy, human health, and on urban and natural environments*, 139-152.

Joshi, B. K. (2008). Buckwheat genetic resources: status and prospects in Nepal. *Agriculture Development Journal*, 5, 13-30.

Jung, G. H., Kim, S. L., Kim, M. J., Kim, S. K., Park, J. H., Kim, C. G., & Heu, S. (2015). Effect of sowing time on buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) growth and yield in central Korea. *Journal of crop science and biotechnology*, 18(4), 285-291.

Kalra, N., Chakraborty, D., Sharma, A., Rai, H. K., Jolly, M., Chander, S., Kumar, P. R., Bhadraray, S., Barman, D., Mittal, R. B., Lal, M., & Sehgal, M. (2008). Effect of increasing temperature on yield of some winter crops in northwest India. *Current Science*, 94(1), 82-88.

- Kasajima, S., Yoshimaru, I., & Itoh, H. (2019). Differentiation and growth of a growing point until the stage of flower bud appearance in leading common buckwheat and Tartary buckwheat varieties in northern Japan. *Fagopyrum*, 36(2), 37-41.
- Kawa, J. M., Taylor, C. G., & Przybylski, R. (2003). Buckwheat concentrate reduces serum glucose in streptozotocin-diabetic rats. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(25), 7287-7291.
- Khanh, T. D., Chung, M. I., Xuan, T. D., & Tawata, S. (2005). The exploitation of crop allelopathy in sustainable agricultural production. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 191(3), 172-184.
- Kim, S. L., Kim, S. K., & Park, C. H. (2004). Introduction and nutritional evaluation of buckwheat sprouts as a new vegetable. *Food Research International*, 37(4), 319-327.
- Koval, D., Plocková, M., Kyselka, J., Skřivan, P., Sluková, M., & Horáčková, S. (2020). Buckwheat secondary metabolites: Potential antifungal agents. *Journal of agricultural and food chemistry*, 68(42), 11631-11643.
- Kreft, I. (2001) Buckwheat research: past, present and future perspectives—20 years of Internationally Coordinated Research. In: Ham, S.S., Choi, S.S., Kim, N.S., Park, C.H. (Eds). Current advances in Buckwheat Research, *Proceedings of the 8th international symposium on buckwheat*. 361–366
- Kreft, I. (2020). Grenko Seme Tatarske Ajde. Slovenska Akademija Znanosti in Umetnosti.
- Krkošková, B., & Mrazova, Z. (2005). Prophylactic components of buckwheat. *Food Research International*, 38(5), 561-568.
- Kumar, S., Kaur, R., Kaur, N., Bhandhari, K., Kaushal, N., Gupta, K., Bains, T.S., & Nayyar, H. (2011). Heat-stress induced inhibition in growth and chlorosis in mungbean (*Phaseolus aureus* Roxb.) is partly mitigated by ascorbic acid application and is related to reduction in oxidative stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 33(6), 2091-2101.
- Kumari, A., & Chaudhary, H. K. (2020). Nutraceutical crop buckwheat: a concealed wealth in the lap of Himalayas. *Critical reviews in biotechnology*, 40(4), 539-554.
- Lavalle, C., Micale, F., Houston, T. D., Camia, A., Hiederer, R., Lazar, C., Conte, C., Amatulli, G., & Genovese, G. (2009). Climate change in Europe. 3. Impact on agriculture and forestry. A review. *Agronomy for sustainable Development*, 29(3), 433-446.
- Lawlor, D. W., & Cornic, G. (2002). Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant, cell & environment*, 25(2), 275-294.
- Lee, L. S., Choi, E. J., Kim, C. H., Sung, J. M., Kim, Y. B., Seo, D. H., Choi, H.W., Choi, Y.S., Kum, J.S., & Park, J. D. (2016). Contribution of flavonoids to the antioxidant properties of common and tartary buckwheat. *Journal of Cereal Science*, 68, 181-186.

- Li, Q-Y., Yang, M-X. (1992) Preliminary investigation on buckwheat origin in Yunnan. In: Lin R, Zhou M, Tao Y, Li J, Zhang Z (Eds) *Proceedings of the 5th International Symposium on Buckwheat*. Agricultural Publishing House. 44-46
- Li, S. Q., & Zhang, Q. H. (2001). Advances in the development of functional foods from buckwheat. *Critical reviews in food science and nutrition*, 41(6), 451-464.
- Li, X., Thwe, A. A., Park, N. I., Suzuki, T., Kim, S. J., & Park, S. U. (2012). Accumulation of phenylpropanoids and correlated gene expression during the development of tartary buckwheat sprouts. *Journal of agricultural and food chemistry*, 60(22), 5629-5635.
- Liu, X., & Huang, B. (2000). Heat stress injury in relation to membrane lipid peroxidation in creeping bent grass. *Crop Sci.* 40, 503–510.
- Liu, H., Able, A. J., & Able, J. A. (2021). Priming crops for the future: Rewiring stress memory. *Trends in Plant Science*, 27(7), 699-716.
- Lloyd, D. G., & Webb, C. J. (1992). The evolution of heterostyly. In *Evolution and function of heterostyly* (pp. 151-178). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Loveland, P. (2011). Encyclopedia of Agrophysics - edited by Glinski, J., Horabik, J. & Lipiec, J.. *European Journal of Soil Science*, 62(6), 913-913.
- Luitel, D. R., Siwakoti, M., Jha, P. K., Jha, A. K., & Krakauer, N. (2017). An overview: distribution, production, and diversity of local landraces of buckwheat in Nepal. *Advances in Agriculture*.
- Luthar, Z., Golob, A., Germ, M., Vombergar, B., & Kreft, I. (2021). Tartary buckwheat in human nutrition. *Plants*, 10(4), 700.
- Ma, J. F., Ryan, P. R., & Delhaize, E. (2001). Aluminium tolerance in plants and the complexing role of organic acids. *Trends in plant science*, 6(6), 273-278.
- Mabhaudhi, T., Chimonyo, V. G. P., Hlahla, S., Massawe, F., Mayes, S., Nhamo, L., & Modi, A. T. (2019). Prospects of orphan crops in climate change. *Planta*, 250(3), 695-708.
- Mahata, D. (2018). Importance of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench). *International Journal of Chemical Studies*, 6(5), 2121-2125.
- Maheswari, M., Yadav, S. K., Shanker, A. K., Kumar, M. A., & Venkateswarlu, B. (2012). Overview of Plant Stresses: Mechanisms, Adaptations and Research Pursuit. *Crop Stress and its Management: Perspectives and Strategies*, 1-18.
- Manickavelu, A., Nadarajan, N., Ganesh, S. K., Gnanamalar, R. P., & Chandra Babu, R. (2006). Drought tolerance in rice: morphological and molecular genetic consideration. *Plant Growth Regulation*, 50(2), 121-138.

- Massawe, F. J., Mayes, S., Cheng, A., Chai, H. H., Cleasby, P., Symonds, R., Hoa, W.K., Siise, A., Wong, Q.N., Kendabie, P., Yanusa, Y., Jamalluddin, N., Singh, A., Azman, R., & Azam-Ali, S. N. (2015). The potential for underutilised crops to improve food security in the face of climate change. *Procedia Environmental Sciences*, 29, 140-141.
- Mathieu, A. S., Lutts, S., Vandoorne, B., Descamps, C., Périlleux, C., Dielen, V., Van Herck, J.C., & Quinet, M. (2014). High temperatures limit plant growth but hasten flowering in root chicory (*Cichorium intybus*) independently of vernalisation. *Journal of Plant Physiology*, 171(2), 109-118.
- Maurya, A. K., Singh, A. U., John, V., & Murmu, R. (2021). Occurrence of *Alternaria alternata* causing leaf spot in Buckwheat (*Fagopyrum esculentum*) in Prayagraj area of Uttar Pradesh, India.
- Mélia, D. S. (2022). Les principaux enseignements du 6e rapport du groupe I du GIEC. In *Annales des Mines-Responsabilité et environnement* (Vol. 106, No. 2, pp. 11-16). FFE.
- Météo-France. (2020). Changement climatique : les scénarios du Giec | Météo-France.
- Mitra, R.K., & Bhatia, C. (2008). Bioenergetic cost of heat tolerance in wheat crop. *Current Science*, 94, 1049-1053.
- Mittler, R. (2006). Abiotic stress, the field environment and stress combination. *Trends in plant science*, 11(1), 15-19.
- Morishita, T., Yamaguchi, H., & Degi, K. (2007). The contribution of polyphenols to antioxidative activity in common buckwheat and tartary buckwheat grain. *Plant production science*, 10(1), 99-104.
- Mortier, P. H. (2020). Simulation des conséquences du changement climatique sur l'évolution des stress abiotiques et de la production de pommes de terre, à l'aide du modèle STICS (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).
- Munjal, R. (2019). Oxidative stress and antioxidant defense in plants under high temperature. *Reactive Oxygen, Nitrogen and Sulfur Species in Plants: Production, Metabolism, Signaling and Defense Mechanisms*, 337-352.
- Munns, R., Schmidt, S., Beveridge, C., Mathesius, U. (2014). *Plants in Action*. Australian Society of Plant Scientists.
- Murai, M., & Ohnishi, O. (1996). Population genetics of cultivated common buckwheat, *Fagopyrum esculentum* Moench. X. Diffusion routes revealed by RAPD markers. *Genes & genetic systems*, 71(4), 211-218.
- Nava, G. A., Dalmago, G. A., Bergamaschi, H., Paniz, R., dos Santos, R. P., & Marodin, G. A. B. (2009). Effect of high temperatures in the pre-blooming and blooming periods on ovule formation, pollen grains and yield of 'Granada' peach. *Scientia Horticulturae*, 122(1), 37-44.

Obendorf, R. L., Horbowicz, M., & Taylor, D. P. (1993). Structure and chemical composition of developing buckwheat seed. *New Crops*, John Wiley and Sons, New York, USA, 244-251.

Ohnishi, O. (1993). Population genetics of cultivated common buckwheat, *Fagopyrum esculentum* Moench. VIII. Local differentiation of land races in Europe and the silk road. *The Japanese Journal of Genetics*, 68(4), 303-316.

Ohnishi, O. (2004). On the origin of cultivated buckwheat. *Advances in Buckwheat research*, 16-21.

Okçu, G., Kaya, M. D., & Atak, M. (2005). Effects of salt and drought stresses on germination and seedling growth of pea (*Pisum sativum* L.). *Turkish journal of agriculture and forestry*, 29(4), 237-242.

ONERC Ministère de la Transition Écologique. (2013). *Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC*. <https://www.parc-golfe-morbihan.bzh/medias/2016/11/Les-sce%CC%81narios-du-GIEC.pdf>

Oomah, B. D., & Mazza, G. (1996). Flavonoids and antioxidative activities in buckwheat. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44(7), 1746-1750.

Opperer, J. (1985). Buckwheat in Germany. *Fagopyrum*, 5, 16-26.

Ouzounidou, G., Vekiari, S., Asfi, M., Gork, M., Sakcali, M., & Ozturk, M. (2012). Photosynthetic characteristics of carob tree (*Ceratonia siliqua* L.) and chemical composition of its fruit on diurnal and seasonal basis. *Pakistan journal of botany*, 44(5), 1689-1695.

Pavek, P. L. S. (2016). Plant Guide for buckwheat (*Fagopyrum esculentum*). *USDA-Natural Resources Conservation Service, Pullman Plant Materials Center*.

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.

Piramila, B. H. M., Prabha, A. L., Nandagopalan, V., & Stanley, A. L. (2012). Effect of heat treatment on germination, seedling growth and some biochemical parameters of dry seeds of black gram. *International Journal of Pharmaceutical and Phytopharmacological Research*, 1, 194-202.

Pirasteh-Anosheh, H., Saed-Moucheshi, A., Pakniyat, H., & Pessarakli, M. (2016). Stomatal responses to drought stress. *Water stress and crop plants: A sustainable approach*, 1, 24-40.

Pirzadah, T.B., & Rehman, R.U. (2021). *Buckwheat: Forgotten Crop for the Future: Issues and Challenges*. CRC Press.

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: Understanding and modeling water stress effects on plant growth processes*, 1, 301-355.

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.

Qing-Fu, C. (2001). Discussion on the origin of cultivated buckwheat in genus *Fagopyrum* (Polygonaceae). *Advances in Buckwheat Research*, 206-213.

Quinet, M., Cawoy, V., Lefevre, I., Van Miegroet, F., Jacquemart, A. L., & Kinet, J. M. (2004). Inflorescence structure and control of flowering time and duration by light in buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench). *Journal of experimental botany*, 55(402), 1509-1517.

Radics, L., & Mikóházi, D. (2010). Principles of common buckwheat production. *The European Journal of Plant Science and Biotechnology*, 4(1), 57-63.

Ramful, D., Baborun, T., Bourdon, E., Tarnus, E., & Aruoma, O. I. (2010). Bioactive phenolics and antioxidant propensity of flavedo extracts of Mauritian citrus fruits: Potential prophylactic ingredients for functional foods application. *Toxicology*, 278(1), 75-87.

Rana, S. S., Mondal, K. K., Pankaj, S., & Rajender, P. (2003). A preliminary study on the herbicidal weed control in buckwheat. *Fagopyrum*, 20, 81-84.

Rousseau, A.N., Quilbé, R., Savary, S., Ricard, S., Moquet, J.-S., Garbouj, M. S., & Duchemin, M. (2007). Vulnérabilité de l'agriculture en réponse aux changements climatiques: étude de l'influence passée et future de l'occupation agricole du territoire sur le régime hydrologique et la qualité de l'eau d'un bassin versant à l'aide d'un système de modélisation intégrée. Rapport final N°R-796-f. Centre Eau, Terre et Environnement, Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE. Québec, PQ.

Saha, S. R., Hossain, M. M., Rahman, M. M., Kuo, C. G., & Abdullah, S. (2010). Effect of high temperature stress on the performance of twelve sweet pepper genotypes. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, 35(3), 525-534.

Sai, T. K. (2021). Soil phosphorous enrichment by buckwheat along with its ability to suppress weeds by allelopathic effect. *International Journal of Chemical Studies*, 9(1), 3607-3609.

- Savin, R., & Nicolas, M. E. (1996). Effects of short periods of drought and high temperature on grain growth and starch accumulation of two malting barley cultivars. *Functional Plant Biology*, 23(2), 201-210.
- Seguin, B., Brisson, N., Loustau, D., Doupouey, J.L.. (2005). Impact du changement climatique sur l'agriculture et la forêt. In: Bard, E. (2006). *L'Homme face au climat : Travaux du collège de France*. Odile Jacob. 177–203.
- Seguin, B. (2010). *Coup de chaud sur l'agriculture*. Delachaux et Niestlé.
- Sheteiwy, M. S., An, J., Yin, M., Jia, X., Guan, Y., He, F., & Hu, J. (2019). Cold plasma treatment and exogenous salicylic acid priming enhances salinity tolerance of *Oryza sativa* seedlings. *Protoplasma*, 256(1), 79-99.
- Shivanna, K. R. (2020). The sixth mass extinction crisis and its impact on biodiversity and human welfare. *Resonance*, 25(1), 93-109.
- Sia, C. L. F., & Quinet, M. (2020). 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*).
- Singh, M., Malhotra, N., & Sharma, K. (2020). Buckwheat (*Fagopyrum* sp.) genetic resources: What can they contribute towards nutritional security of changing world ?. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 67(7), 1639-1658.
- Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144-158.
- Song, Y., Jia, Z., Hou, Y., Ma, X., Li, L., Jin, X., & An, L. (2020). Roles of DNA methylation in cold priming in Tartary buckwheat. *Frontiers in plant science*, 2022.
- Small, E. (2017). 54. Buckwheat—the world's most biodiversity-friendly crop ?. *Biodiversity*, 18(2-3), 108-123.
- Smirnoff, N. (1993). Tansley Review No. 52. The role of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation. *New phytologist*, 27-58.
- Steadman, K. J., Burgoon, M. S., Lewis, B. A., Edwardson, S. E., & Obendorf, R. L. (2001). Minerals, phytic acid, tannin and rutin in buckwheat seed milling fractions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81(11), 1094-1100.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I.M., Murphy, A. (2006). *Plant Physiology and development*. Sinauer Associates Inc Publishers.
- Taylor, R. W. (1998). Buckwheat. Cooperative Extension, University of Delaware, College of Agriculture and Natural Resources.

- Toh, S., Imamura, A., Watanabe, A., Nakabayashi, K., Okamoto, M., Jikumaru, Y., Hanada, A., Aso, Y., Ishiyama, K., Tamura, N., Iuchi, S., Kobayashi, M., Yamaguchi, S., Kamiya, Y., Nambara, E., & Kawakami, N. (2008). High temperature-induced abscisic acid biosynthesis and its role in the inhibition of gibberellin action in *Arabidopsis* seeds. *Plant physiology*, 146(3), 1368-1385.
- Tsuji, K., & Ohnishi, O. (2001). Phylogenetic position of east Tibetan natural populations in Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* Gaert.) revealed by RAPD analyses. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 48(1), 63-67.
- Tsukada, M., Sugita, S., & Tsukada, Y. (1986). Oldest primitive agriculture and vegetational environments in Japan. *Nature*, 322(6080), 632-634.
- Tuan, P. A., Thwe, A. A., Kim, Y. B., Kim, J. K., Kim, S. J., Lee, S., Chung, S.O., & Park, S. U. (2013). Effects of white, blue, and red light-emitting diodes on carotenoid biosynthetic gene expression levels and carotenoid accumulation in sprouts of tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* Gaertn.). *Journal of agricultural and food chemistry*, 61(50), 12356-12361.
- Vandelook, F., & Van Assche, J. A. (2008). Temperature requirements for seed germination and seedling development determine timing of seedling emergence of three monocotyledonous temperate forest spring geophytes. *Annals of Botany*, 102(5), 865-875.
- Van Ypersele, J-P., Marbaix, P., Lamarque, P. & Rondiat, E., (2021). 6e rapport d'évaluation du GIEC. Changements climatiques 2021 : les éléments scientifiques. Aperçu du résumé pour les décideurs. Lettre de la Plateforme wallonne pour le GIEC, 21, édition spéciale août 2021.
- Vollenweider, P., & Günthardt-Goerg, M. S. (2005). Diagnosis of abiotic and biotic stress factors using the visible symptoms in foliage. *Environmental Pollution*, 137(3), 455-465.
- Von Uexküll, H. R., & Mutert, E. (1995). Global extent, development and economic impact of acid soils. *Plant and soil*, 171(1), 1-15.
- Wada, Y., Van Beek, L. P., Wanders, N., & Bierkens, M. F. (2013). Human water consumption intensifies hydrological drought worldwide. *Environmental Research Letters*, 8(3), 034036.
- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M.A., & Foolad, M.R. (2007). Heat tolerance in plants: An overview. *Environmental and Experimental Botany*, 61, 199-223.
- Wahid, A. (2007). Physiological implications of metabolite biosynthesis for net assimilation and heat-stress tolerance of sugarcane (*Saccharum officinarum*) sprouts. *Journal of plant Research*, 120(2), 219-228.

- Wang, T.Y. (1989). Buckwheat germplasm in Tibet. In: A Collection of Scientific Treatises on Buckwheat in China (Ed. Buckwheat Res.Ass.). *Academic Journal Publishing Co.* 49–51
- Wang, H., Chen, R. F., Iwashita, T., Shen, R. F., & Ma, J. F. (2015). Physiological characterization of aluminum tolerance and accumulation in tartary and wild buckwheat. *New Phytologist*, 205(1), 273-279.
- Wang, J., Vanga, S. K., Saxena, R., Orsat, V., & Raghavan, V. (2018). Effect of climate change on the yield of cereal crops: a review. *Climate*, 6(2), 41.
- Warland, J. S., McDonald, M. R., & McKeown, A. M. (2006). Annual yields of five crops in the family Brassicaceae in southern Ontario in relation to weather and climate. *Canadian Journal of Plant Science*, 86, 1209-1215.
- Wijngaard, H., & Arendt, E. K. (2006). Buckwheat. *Cereal chemistry*, 83(4), 391-401.
- World Meteorological Organization. (2021). State of the Global Climate 2021. WMO-No. 1290.
- Wu, L. Y., Wang, B., Schoen, D. J., & Huang, S. Q. (2017). Transitions from distyly to homostyly are associated with floral evolution in the buckwheat genus (*Fagopyrum*). *American Journal of Botany*, 104(8), 1232-1240.
- Xuan, T. D. & Tsuzuki, E. (2004). Allelopathic plants: buckwheat (*Fagopyrum* spp.). *Allelopathy Journal*, 13, 137-148.
- Yadav, L. & Yadav, U. (2022). Pseudocereals: A Novel Path towards Healthy Eating. In Waisundara, V. Y. (2022). *Pseudocereals*. IntechOpen.
- Yilmaz, H. Ö., Ayhan, N. Y., & Meriç, Ç. S. (2020). Buckwheat: a useful food and its effects on human health. *Current Nutrition & Food Science*, 16(1), 29-34.
- Zeid, I. M., & Shedeed, Z. A. (2006). Response of alfalfa to putrescine treatment under drought stress. *Biologia plantarum*, 50(4), 635-640.
- Zewen, C. (2003). Buckwheat without borders. In: Kreft, I., Chang, K. C., Choi, Y. S., & Park, C. H. (2003.). *Ethnobotany of buckwheat*. Jinsol Publishing Company.
- Zhang, Y., Li, X., & Wang, Z. (2010). Antioxidant activities of leaf extract of *Salvia miltiorrhiza* Bunge and related phenolic constituents. *Food and Chemical Toxicology*, 48(10), 2656-2662.

Zhang, L., Li, X., Ma, B., Gao, Q., Du, H., Han, Y., Li Y., Cao Y., Qi M., Zhu Y., Lu H., Ma M., Liu L., Zhou J., Nan C., Qin Y., Wang J., Cui L., Liu H., ... & Qiao, Z. (2017). The tartary buckwheat genome provides insights into rutin biosynthesis and abiotic stress tolerance. *Molecular Plant*, 10(9), 1224-1237.

Zhang, K., He, M., Fan, Y., Zhao, H., Gao, B., Yang, K., Li, F., Tang, Y., Gao, Q., Lin, T., Quinet, M., Janovská, D., Meglič, V., Kwiatkowski, J., Romanova, O., Chrungoo, N., Suzuki, T., Luthar, Z., Germ, M. ... & Zhou, M. (2021). Resequencing of global Tartary buckwheat accessions reveals multiple domestication events and key loci associated with agronomic traits. *Genome biology*, 22(1), 1-17.

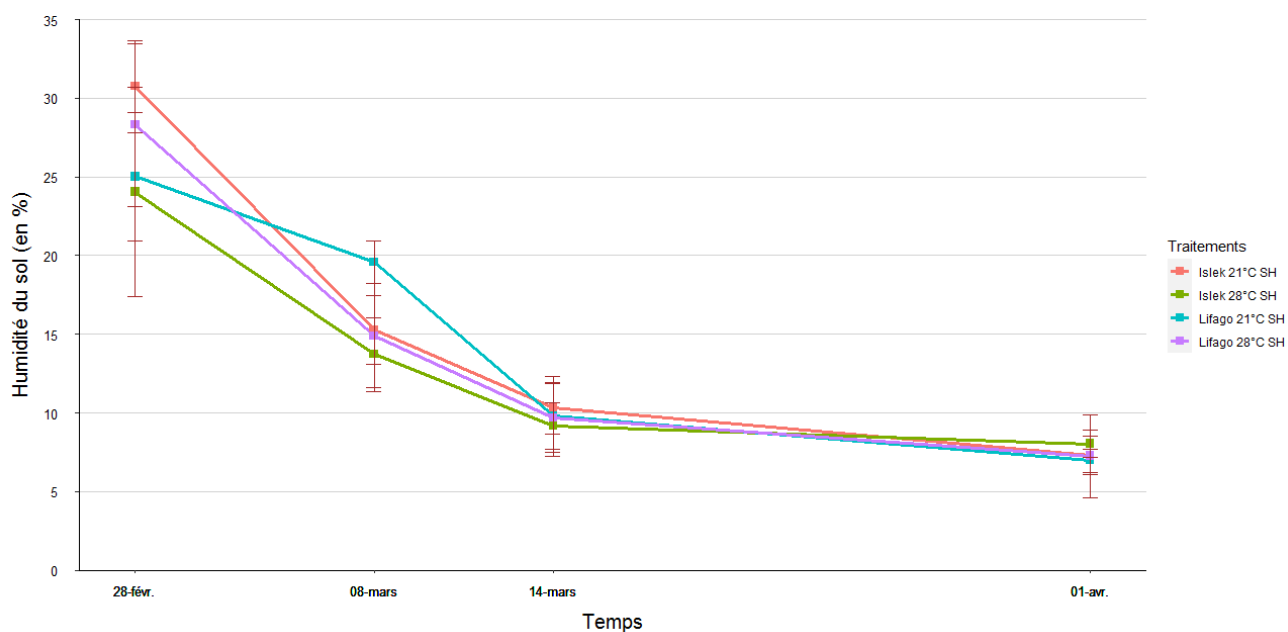
Zhu, H., Wang, H., Zhu, Y., Zou, J., Zhao, F. J., & Huang, C. F. (2015). Genome-wide transcriptomic and phylogenetic analyses reveal distinct aluminum-tolerance mechanisms in the aluminum-accumulating species buckwheat (*Fagopyrum tataricum*). *BMC Plant Biology*, 15(1), 1-13.

Zhu, F. (2016). Chemical composition and health effects of Tartary buckwheat. *Food Chemistry*, 203, 231-245.

Zielińska, D., Turemko, M., Kwiatkowski, J., & Zieliński, H. (2012). Evaluation of flavonoid contents and antioxidant capacity of the aerial parts of common and tartary buckwheat plants. *Molecules*, 17(8), 9668-9682.

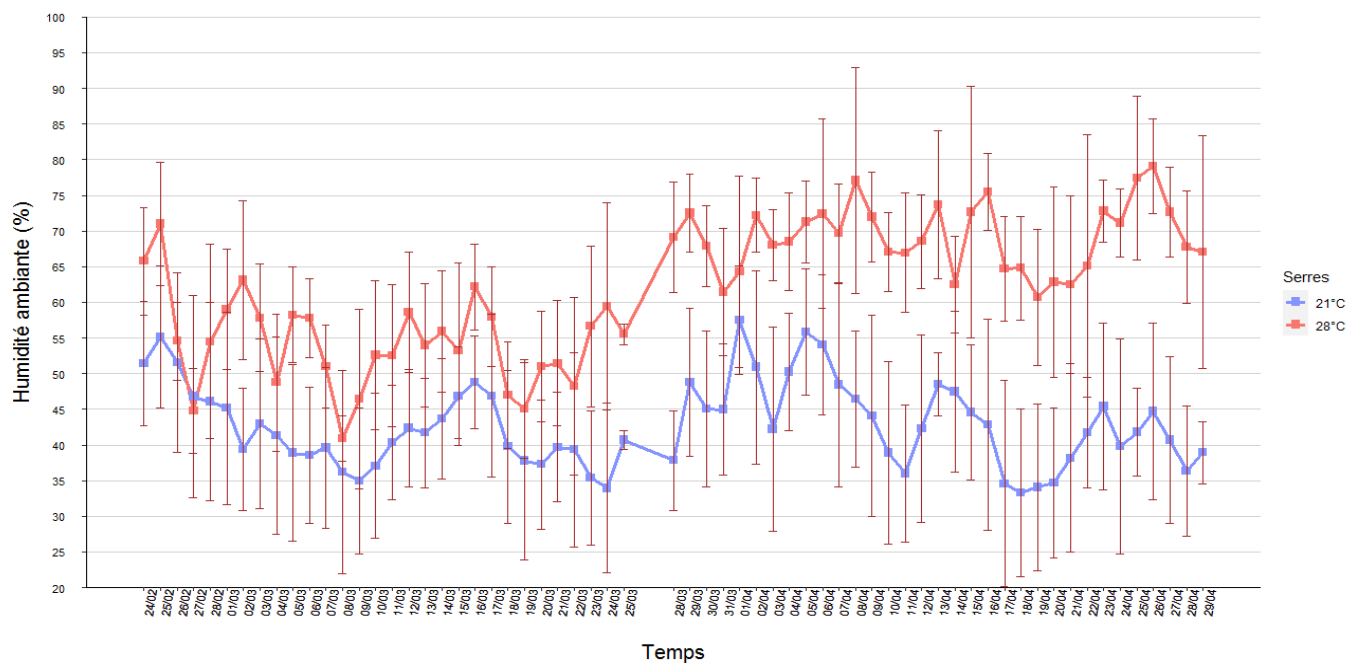
## Annexes

### Annexe 1 :



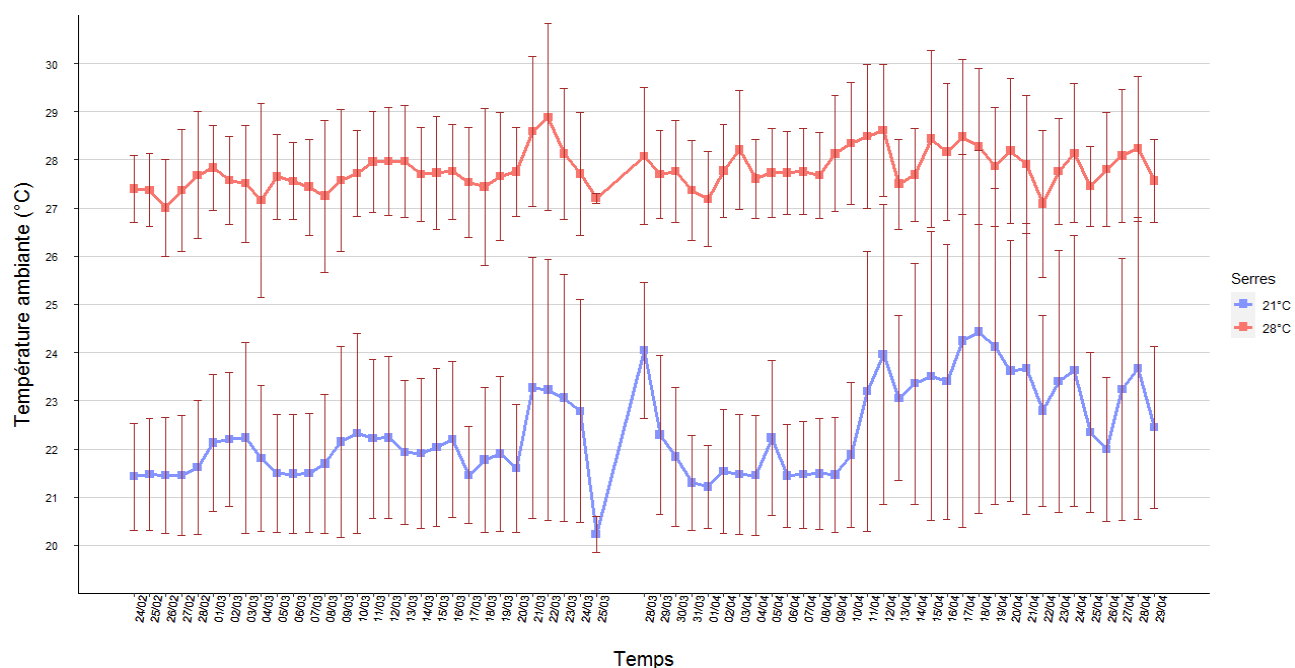
Evolution du pourcentage d'humidité dans le sol au cours du temps chez les plantes stressées hydriquement chez deux variétés de sarrasin de Tartarie

### Annexe 2 :



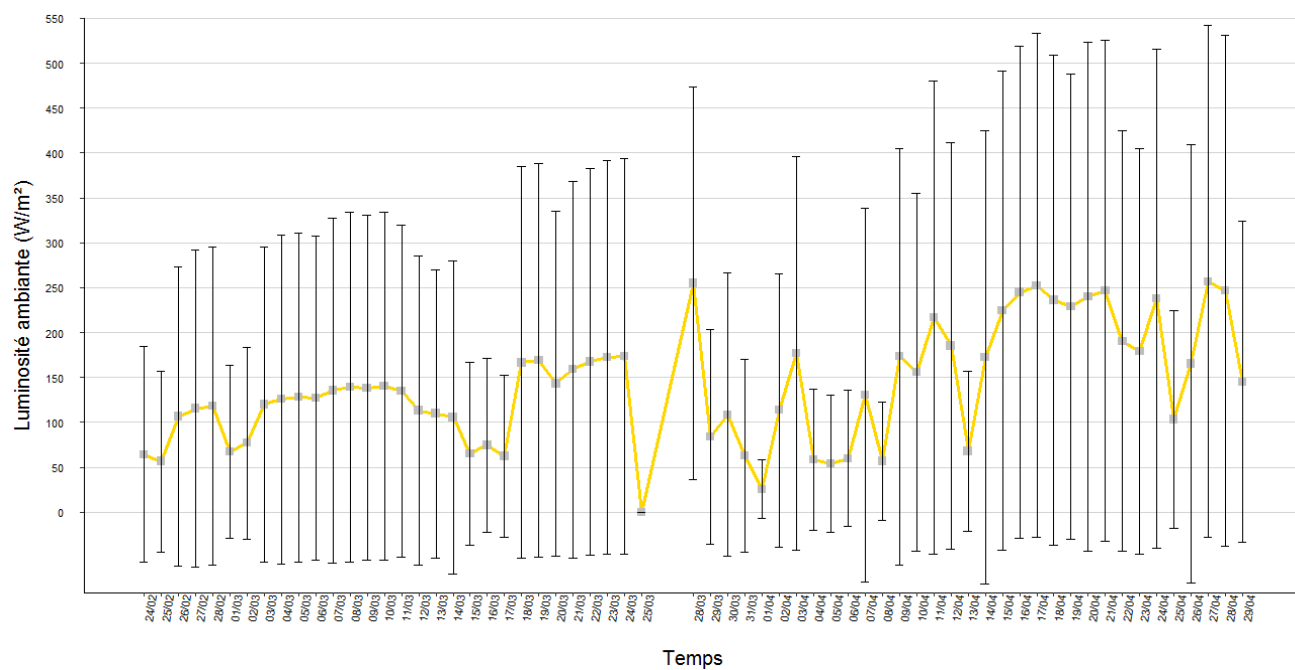
Evolution de l'humidité ambiante dans les 2 serres durant toute la durée de la culture

### Annexe 3 :



Evolution de la température ambiante dans les 2 serres durant toute la durée de la culture

### Annexe 4 :



Evolution de la luminosité ambiante dans le bâtiment des serres durant toute la durée de la culture

Annexe 5 : Tableau regroupant l'ensemble des analyses statistiques des résultats d'ANOVA 3 (SH : stress hydrique, ST : stress thermique)

| Variable                      | Var                        | SH                         | ST                          | SH*ST                     | Var*SH                   | Var*ST                     | Var*SH*ST                 |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Taille                        | F=661.2794<br>P=< 2e-16    | F=4.8199<br>P=0.03136      | F=0.3636<br>P=0.54842       | F=0.3985<br>P=0.52988     | F=4.1316<br>P=0.04578    | F=0.8159<br>P=0.36938      | F=0.0653<br>P=0.79901     |
| Feuilles                      | F=90.2193<br>P=5.713e-14   | F=54.0109<br>P=3.864e-10   | F=42.6438<br>P=1.099e-08    | F= 0.0259<br>P=0.872725   | F=0.0613<br>P=0.805287   | F=7.7078<br>P=0.007148     | F=0.0078<br>P=0.929881    |
| Inflorescences                | F=2232.8301<br>P=< 2.2e-16 | F=106.2142<br>P=4.596e-15  | F=92.2319<br>P=6.949e-14    | F=0.6885<br>P=0.4098553   | F=13.9100<br>P=0.0004179 | F=16.6519<br>P=0.0001306   | F=0.0477<br>P=0.8278245   |
| Ramifications                 | F=17.357<br>P=0.0003459    | F=0.8571<br>P=0.3637561    | F=21.4286<br>P=0.0001066    | F=0.0000<br>P=1.0000000   | F=0.2143<br>P=0.6475989  | F=5.3571<br>P=0.0295104    | F=1.9286<br>P=0.1776692   |
| Feuilles /ramification        | F=59.3754<br>P=6.089e-08   | F=4.0053<br>P=0.056788     | F=33.8996<br>P=5.282e-06    | F=2.8108<br>P=0.106613    | F=0.6998<br>P=0.411111   | F=11.3910<br>P=0.002507    | F=0.1323<br>P=0.719253    |
| Inflorescences /ramification  | F=177.6123<br>P=1.383e-12  | F=59.2219<br>P=6.228e-08   | F=6.3590<br>P=0.01873       | F=1.2972<br>P=0.26597     | F=0.2954<br>P=0.59178    | F=32.6403<br>P=6.926e-06   | F=0.0005<br>P=0.98310     |
| Poids frais Feuilles          | F=30.3437<br>P=4.766e-05   | F=0.0103<br>P=0.92060      | F=0.5298<br>P=0.47721       | F=3.6109<br>P=0.07558     | F=1.6697<br>P=0.21465    | F=1.7492<br>P=0.20457      | F=0.2120<br>P=0.65140     |
| Poids sec Feuilles            | F=26.1829<br>P=0.0001035   | F=0.7979<br>P=0.3849563    | F=8.7003<br>P=0.0094177     | F=6.4502<br>P=0.0218521   | F=4.6509<br>P=0.0465967  | F=0.5114<br>P=0.4848587    | F=0.1141<br>P=0.7399316   |
| Poids frais Inflorescences    | F=51.0576<br>P=2.325e-06   | F=0.0737<br>P=0.78948      | F=61.6718<br>P=7.046e-07    | F=4.5810<br>P=0.04808     | F=0.0345<br>P=0.85491    | F=4.6147<br>P=0.04736      | F=0.7682<br>P=0.39374     |
| Poids sec Inflorescences      | F=25.4708<br>P=0.0001191   | F=0.8874<br>P=0.3602026    | F=59.4176<br>P=8.949e-07    | F=3.2485<br>P=0.0903579   | F=0.0762<br>P=0.7860888  | F=13.4557<br>P=0.0020773   | F=0.8345<br>P=0.3745466   |
| Poids frais Tiges             | F=232.4073<br>P=5.992e-11  | F=0.4357<br>P=0.51862      | F=1.4072<br>P=0.25285       | F=26.8152<br>P=9.150e-05  | F=0.5940<br>P=0.45212    | F=3.0489<br>P=0.09996      | F=0.4122<br>P=0.52994     |
| Poids sec Tiges               | F= 44.4012<br>P= 5.447e-06 | F= 0.1901<br>P= 0.66866    | F= 6.7717<br>P= 0.01925     | F= 6.0311<br>P= 0.02587   | F= 0.1772<br>P= 0.67935  | F= 7.2965<br>P= 0.01573    | F= 2.8909<br>P= 0.10843   |
| Poids frais Graines           | F=4.1498<br>P=0.064319     | F=41.0332<br>P=3.374e-05   | F=213.4648<br>P=5.249e-09   | F=15.3238<br>P=0.002055   | F=5.6384<br>P=0.035111   |                            |                           |
| Poids sec Graines             | F=24.5317<br>P=0.0003347   | F=77.1928<br>P=1.423e-06   | F=376.1507<br>P=1.996e-10   | F=19.4372<br>P=0.0008522  | F=7.6733<br>P=0.0169594  |                            |                           |
| Teneur en eau Feuilles        | F=10.9601<br>P=0.0044194   | F=6.0789<br>P=0.0253702    | F=74.4213<br>P=2.056e-07    | F=1.5846<br>P=0.2261577   | F=8.0108<br>P=0.0120616  | F=16.4004<br>P=0.0009296   | F=7.8318<br>P=0.0128802   |
| Teneur en eau Inflorescences  | F= 9.9545<br>P= 0.00613    | F= 0.4406<br>P= 0.51628    | F= 5.0012<br>P= 0.03992     | F= 0.3435<br>P= 0.56598   | F= 0.2896<br>P= 0.59785  | F= 2.1736<br>P= 0.15980    | F= 0.3435<br>P= 0.56598   |
| Teneur en eau Tiges           | F= 0.9568<br>P= 0.3425506  | F= 0.1353<br>P=0.7178200   | F= 12.7094<br>P=0.0025832   | F= 7.7237<br>P=0.0134053  | F= 0.2444<br>P=0.6277921 | F= 21.1280<br>P= 0.0002979 | F= 7.7237<br>P= 0.0134053 |
| Teneur en eau Graines         | F=62.3493<br>P= 4.297e-06  | F= 3.2685<br>P= 0.09574    | F= 258.3084<br>P= 1.761e-09 | F= 1.8417<br>P= 0.19973   | F= 1.9267<br>P= 0.19035  |                            |                           |
| Chlorophylle                  | F=51.4901<br>P=5.237e-10   | F=10.4197<br>P=0.001878    | F=48.7810<br>P=1.181e-09    | F=2.2342<br>P=0.139352    | F=4.3180<br>P=0.041278   | F=2.0732<br>P=0.154237     | F=4.4726<br>P=0.037904    |
| Azote                         | F= 82.8866<br>P= 1.337e-13 | F= 14.2596<br>P=0.0003248  | F= 75.3793<br>P= 8.169e-13  | F= 1.7526<br>P=0.1897361  | F= 4.9486<br>P=0.0292473 | F= 0.6731<br>P= 0.4146830  | F= 6.3755<br>P= 0.0137738 |
| Conductance stomatique        | F= 0.2435<br>P= 0.627076   | F= 79.4526<br>P= 2.109e-08 | F= 2.8347<br>P= 0.107793    | F= 10.9938<br>P= 0.003450 | F= 0.5708<br>P= 0.458747 | F= 11.3245<br>P= 0.003079  | F= 0.2442<br>P= 0.626570  |
| Efficience du photosystème II | F=0.4792<br>P=0.49542      | F=0.5254<br>P=0.47556      | F=0.0135<br>P=0.90862       | F=0.0062<br>P=0.93795     | F=0.7249<br>P=0.40295    | F=0.3494<br>P=0.55995      | F=4.4607<br>P=0.04528     |
| Photochemical quenching       | F=2.3652<br>P=0.1372       | F=0.1415<br>P=0.7101       | F=0.5588<br>P=0.4620        | F=1.1072<br>P=0.3032      | F=0.1716<br>P=0.6824     | F=0.1344<br>P=0.7171       | F=1.0873<br>P=0.3075      |

|                             |                           |                          |                            |                           |                          |                          |                         |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Non-photochemical quenching | F=1.0484<br>P=0.316094    | F=0.1841<br>P=0.671705   | F=13.0530<br>P=0.001392    | F=3.9961<br>P=0.057051    | F=5.0084<br>P=0.034769   | F=1.8109<br>P=0.190978   | F=1.4739<br>P=0.236541  |
| Potentiel osmotique         | F=4.8849<br>P=0.04201     | F=1.6400<br>P=0.21858    | F=49.2188<br>P=2.915e-06   | F=1.4486<br>P=0.24625     | F=0.2461<br>P=0.62655    | F=4.0456<br>P=0.06144    | F=1.3470<br>P=0.26282   |
| MDA                         | F=15.2892<br>P=0.0003579  | F=0.0008<br>P=0.9777967  | F=19.6198<br>P=7.433e-05   | F=2.6826<br>P=0.1094967   | F=1.5277<br>P=0.2238477  | F=1.4310<br>P=0.2388238  | F=0.9197<br>P=0.3434652 |
| Graines vertes              | F=219.9216<br>P=1.392e-13 | F=0.1108<br>P=0.7421536  | F=52.6393<br>P=1.701e-07   | F=0.7462<br>P=0.3962264   | F=5.5605<br>P=0.0268572  | F=20.5457<br>P=0.0001363 | F=3.3381<br>P=0.0801539 |
| Graines brunes              | F=0.2993<br>P=0.5893      | F=42.8959<br>P=8.966e-07 | F=1305.1459<br>P=< 2.2e-16 | F=40.0447<br>P=1.529e-06  | F=0.2960<br>P=0.5914     | F=1.4305<br>P=0.2434     | F=0.1041<br>P=0.7498    |
| Poids 1000 grains           | F=0.9580<br>P=0.33745     | F=3.1922<br>P=0.08663    | F=192.8553<br>P=5.744e-13  | F=0.0459<br>P=0.83212     | F=0.1524<br>P=0.69967    | F=6.5084<br>F=0.01753    | F=1.3970<br>P=0.24880   |
| Potassium                   | F=8.6258<br>P=0.0068548   | F=1.3577<br>P=0.2545218  | F=16.5728<br>P=0.0003884   | F=4.4929<br>P=0.0437434   | F=19.1966<br>P=0.0001720 |                          |                         |
| Magnésium                   | F=0.2934<br>P=0.592640    | F=0.0930<br>P=0.762767   | F=37.1720<br>P=1.919e-06   | F= 12.5827<br>P= 0.001504 | F=0.1046<br>P=0.749017   |                          |                         |
| Calcium                     | F=13.4687<br>P=0.001208   | F=1.0329<br>P=0.319609   | F=5.5416<br>P=0.027092     | F=0.2844<br>P=0.598731    | F=0.0022<br>P=0.963197   |                          |                         |
| Fer                         | F=13.0339<br>P=0.001338   | F=4.7422<br>P=0.039076   | F=7.1300<br>P=0.013131     | F=3.8201<br>P=0.061911    | F=3.3539<br>P=0.078988   |                          |                         |
| Zinc                        | F=4.5139<br>P=0.043289    | F=0.2298<br>P=0.635716   | F=11.2152<br>P=0.002485    | F=1.1559<br>P=0.292202    | F=0.0694<br>P=0.794217   |                          |                         |
| Cuivre                      | F=25.0356<br>P=3.329e-05  | F=29.9369<br>P=9.727e-06 | F=66.4936<br>P=1.234e-08   | F=9.8773<br>P=0.00415     | F=1.8431<br>P=0.18625    |                          |                         |
| Polyphénols                 | F=0.1752<br>P=0.679100    | F=5.6345<br>P=0.025607   | F=0.7175<br>P=0.404995     | F=8.2062<br>P=0.008338    | F=1.3188<br>P=0.261670   | F=4.2901<br>P=0.048807   | F=7.9730<br>P=0.009185  |
| Flavonoïdes                 | F=27.6839<br>P=1.897e-05  | F=0.8251<br>P=0.37238    | F=2.6375<br>P=0.11691      | F=3.9355<br>P=0.05836     | F=1.6165<br>P=0.21529    | F=1.4838<br>P=0.23455    | F=1.7064<br>P=0.20334   |

# Impact d'une hausse de température et d'un déficit hydrique sur la croissance, la reproduction et la qualité des graines du sarrasin de Tartarie (*Fagopyrum tataricum*) dans le contexte des changements climatiques

## VERGEADE Marie-Floriane

---

### Résumé

Dans un contexte d'augmentation des températures et des épisodes de sécheresse ainsi que de mise en danger de la santé et sécurité alimentaires, il apparaît comme une évidence de se tourner vers des cultures alternatives plus respectueuses de l'environnement et plus résistantes aux stress environnementaux futurs. Ainsi, le sarrasin de Tartarie (*Fagopyrum tataricum*), pseudo-céréale à reproduction auto-compatible, possède une grande adaptabilité écologique et un rendement plus élevés que le sarrasin commun, ce dernier néanmoins plus cultivé.

Notre étude vise à comparer l'impact individuel et combiné des stress thermique et hydrique sur la croissance, la physiologie et la production et qualité des graines de deux variétés de sarrasin de Tartarie. Pour ce faire, durant 2 mois et demi de culture en serres, deux variétés de sarrasin de Tartarie, Islek et Lifago, ont été soumises à un stress thermique (21°C ou 28°C) et à un stress hydrique (arrosage régulier ou réduit). Différents paramètres de croissance tels que la taille ou le nombre de feuilles ont été suivis durant toute la durée de la culture et des paramètres physiologiques ont été analysés comme la conductance stomatique, la photosynthèse ou le potentiel osmotique. La production et la qualité des graines ont été étudiées ainsi que la teneur en antioxydants dans les inflorescences afin d'évaluer le potentiel nutraceutique du sarrasin de Tartarie.

Nos résultats ont montré que le stress thermique induisait de plus forts impacts que le stress hydrique chez les deux variétés, tant sur l'aspect morphologique que physiologique. La combinaison des deux stress a eu un effet plus marqué que les stress individuels mais uniquement sur la physiologie. Les deux variétés ont su mettre en place des mécanismes de résistance au stress thermique et d'évitement au stress hydrique. Cependant, de grandes différences existaient entre Islek et Lifago. Islek présentait en effet une petite taille, un nombre limité de feuilles et d'inflorescences et n'a produit aucune graine à 28°C. Au niveau physiologique, il a été observé que la variété Lifago a été nettement moins impactée par les stress et se révèle être plus résistante qu'Islek. Au sujet du potentiel nutraceutique, Lifago domine également puisque la concentration en minéraux dans ses quelques graines produites a su être maintenue voire augmentée. Le même constat est établi quant aux concentrations en antioxydants dans les inflorescences, plus élevées et stables avec les stress chez Lifago qu'Islek.

Le sarrasin de Tartarie, et plus spécifiquement la variété Lifago, semblant bien supporter les stress, se dessine alors comme une culture prometteuse. Un approfondissement sur son étude permettrait de valoriser son potentiel nutraceutique face aux changements climatiques. Cette pseudo-céréale à la culture facile et écologique pourrait ainsi faire l'objet d'améliorations pour augmenter son rendement, plus faible que celui des céréales traditionnelles.

Mots clés : *Fagopyrum tataricum*, Islek, Lifago, Stress thermique, Stress hydrique, Antioxydants

Impact of a temperature increase and a water deficit on the growth,  
reproduction and quality of seeds of Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*)  
in the context of climate change  
VERGEADE Marie-Floriane

---

## Abstract

In a context of rising temperatures and episodes of drought as well as endangering food health and safety, it seems obvious to turn to alternative crops that are more environmentally friendly and more resistant to future environmental stresses. Thus, Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*), a pseudo-cereal with self-compatible reproduction, has a better ecological adaptability and a higher yield than common buckwheat, which is nevertheless more cultivated.

Our study aims to compare the individual and combined impact of thermal and water stress on the growth, physiology and seed production and quality of two varieties of Tartary buckwheat. To this end, during 2 and a half months of cultivation in greenhouses, two varieties of Tartary buckwheat, Islek and Lifago, were subjected to thermal stress (21°C or 28°C) and water stress (regular watering or reduced). Different growth parameters such as height or number of leaves were monitored throughout the duration of the culture and physiological parameters were analyzed such as stomatal conductance, photosynthesis or osmotic potential. Seed production and quality were studied as well as antioxidant content in inflorescences to assess the nutraceutical potential of Tartary buckwheat.

Our results showed that heat stress induced stronger impacts than water stress in both varieties, both on the morphological and physiological aspects. The combination of the two stresses had a more marked effect than the individual stresses but only on the physiology. Both varieties were able to establish mechanisms of resistance to heat stress and avoidance of water stress. However, big differences existed between Islek and Lifago. Islek had indeed a small size, a limited number of leaves and inflorescences and did not produce any seeds at 28°C. At the physiological level, it was observed that the Lifago variety was significantly less impacted by stress and proved to be more resistant than Islek. Regarding the nutraceutical potential, Lifago also dominates since the concentration of minerals in its few seeds produced has been able to be maintained or even increased. The same observation is established for the concentrations of antioxidants in the inflorescences, which are higher and more stable with the stresses in Lifago than in Islek.

Tartary buckwheat, and more specifically the Lifago variety, seeming to withstand stress well, thus emerges as a promising crop. A deepening of its study would make it possible to enhance its nutraceutical potential in the face of climate change. This pseudo-cereal, which is easy to grow and ecological, could thus be improved to increase its yield, which is lower than the traditional cereals.

Keywords : *Fagopyrum tataricum*, Islek, Lifago, Thermic stress, Hydric stress, Antioxidants