

Faculté des bioingénieurs

Quantification de la vulnérabilité d'une culture de riz (IR29) face aux chutes de téphra

Auteur : Gervais Victoria

Promoteur(s) : Delmelle Pierre & Ligot Noa

Lecteur(s) : Bogaert Patrick & Couvreur Valentin

Année académique 2023-2024

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

Remerciements

Un remerciement spécial à mon promoteur, Pierre Delmelle, pour m'avoir offert l'opportunité de participer à une expérience unique, m'avoir proposé un sujet passionnant et pour son leadership à 100% dans la finalisation du mémoire. Ses retours rapides et conseils perspicaces ont été d'une grande aide, tout comme sa confiance, son encouragement et le partage de ses connaissances.

Ensuite j'exprimerai ma gratitude envers Noa Ligot pour son accompagnement, ses conseils avisés et son soutien continu tout au long de mon mémoire. Sa disponibilité, son engagement et son dynamisme ont grandement contribué à la réussite de ce projet.

Mes remerciements s'adressent également à Marc Mignon, Thomas Dagbert, pour leur accueil chaleureux, disponibilité et aide pendant la période d'expérimentation. Merci également à Nhung Phan Thi Hong, Pierre Van Thorre et Hermann Prodjimoto pour vos conseils concernant la culture du riz. Un immense merci à toutes les personnes qui ont pris le temps de répondre à mes questions et m'apporter leur aide. Vos contributions ont été essentielles pour faire progresser mes recherches et lever certaines interrogations. La réalisation de ce travail aurait été impossible sans le soutien précieux de nombreuses personnes, et je tiens à exprimer ma gratitude à chacune d'entre elles. Merci également à Sébastien François, l'équipe ELI-A, le hall EFOR, la plateforme MOCA, l'équipe « SOLS », la ferme de Marbaix et toutes les personnes qui ont permis l'accès aux équipements nécessaires à la bonne conduite de mes expériences. Leurs contributions ont été essentielles pour la réalisation de ce travail.

Un sincère merci à ma famille pour leur soutien constant, à la fois moral et physique, durant les périodes intensives du mémoire. Leur présence a joué un rôle crucial pour maintenir ma motivation, le travail aurait été insurmontable en solitaire.

Enfin, je tiens à remercier mes lecteurs, Patrick Bogaert et Valentin Couvreur, pour leur engagement et le temps consacré à l'évaluation de ce travail. Votre contribution est grandement appréciée.

Table des matières

I.	INTRODUCTION.....	1
II.	OBJECTIF.....	2
III.	ÉTAT DE L'ART	3
3.1.	LES VOLCANS ACTIFS	3
3.1.1.	<i>Localisation des volcans actifs</i>	3
3.1.2.	<i>Les éruptions volcaniques</i>	3
3.1.3.	<i>Le téphra</i>	5
3.1.3.1.	Formation du téphra	5
3.1.3.2.	Propriétés physico-chimiques du téphra	5
3.1.3.3.	Dispersion et dépôt du téphra.....	6
3.2.	L'AGRICULTURE AUX ABORDS DES VOLCANS ACTIFS.....	8
3.2.1.	<i>Caractéristique et formations des sols volcaniques</i>	8
3.2.2.	<i>Interactions entre la démographie, l'agriculture et les zones volcaniques actives</i>	9
3.2.3.	<i>Impacts du téphra sur les cultures</i>	9
3.2.3.1.	Impact mécanique du dépôt de téphra sur les cultures.....	10
3.2.3.2.	Impact chimique du dépôt de téphra sur les cultures	11
3.2.3.3.	Impact physiologique dépôt de téphra sur les cultures	12
3.3.	RISQUE DES RETOMBÉES DU TÉPHRA SUR LES CULTURES	13
3.3.1.	<i>Vulnérabilité des cultures due aux aléas volcaniques</i>	14
3.3.1.1.	Vulnérabilité des cultures et fonction de fragilité	14
3.3.1.2.	Incertitude et lacunes des connaissances.....	15
IV.	MATÉRIELS ET MÉTHODES	17
4.1.	MATÉRIEL VÉGÉTAL.....	17
4.2.	CONDITIONS DE CULTURE	20
4.3.	LES TÉPHRA : UTILISATION, PROPRIÉTÉS ET TEST HOMOGÉNÉITÉ.....	23
4.4.	RECOLTE ET COLLECTE DE DONNEES	24
4.5.	TRAITEMENT DE DONNEES	27
V.	RÉSULTATS.....	29
5.1.	INTERCEPTION ET RÉTENTION DES TÉPHRA SUR LE FEUILLAGE	29
5.2.	IMPACT DES TÉPHRA SUR LA CROISSANCE VÉGÉTATIVE	31
5.2.1.	<i>Évolution de la hauteur des plantes au cours de la culture</i>	31
5.2.2.	<i>Évolution du nombre de feuilles au cours de la culture</i>	32
5.2.3.	<i>Évolution de la sortie des panicules au cours de la culture</i>	33
5.3.	IMPACT DES TÉPHRA SUR LA PRODUCTION	34
5.3.1.	<i>Fertilisation</i>	34
5.3.1.1.	Nombre de panicules et pourcentage de panicules fécondés	34
5.3.1.2.	Nombre et taux d'épillet fertiles	35

5.3.2.	<i>Biomasse</i>	36
5.3.2.1.	Poids des épis.....	36
5.3.2.2.	Poids de la paille (feuilles et tiges)	37
5.4.	TENEURS EN POTASSIUM, CALCIUM ET SILICIUM DANS LES DIFFÉRENTES PARTIES DE LA PLANTE	37
VI.	DISCUSSION	40
6.1.	FACTEURS INFLUENÇANT L'INTERCEPTION ET LA RÉTENTION DES TÉPHRA PAR LES PLANTES DE RIZ ..	40
6.2.	INFLUENCE DU DÉPÔT DE TÉPHRA SUR LA CROISSANCE DE LA CULTURE DE RIZ.....	41
6.3.	EFFET FERTILISANT DES TEPHRA SUR LA CULTURE DE RIZ	42
6.4.	VULNÉRABILITÉS DES PLANTS DE RIZ FACE AU DÉPÔTS DE TÉPHRA	43
6.5.	LIMITES ET PERSPECTIVES DE L'ÉTUDE	46
VII.	CONCLUSION GÉNÉRALE	48
	BIBLIOGRAPHIE	50
	APPENDICES	62

Mots clefs

Éruption volcanique, téphra, vulnérabilité du riz, fonction de fragilité, évaluation du risque.

Liste des figures

Figure 1: Distribution mondiale des volcans depuis l'Holocène et des principales plaques tectoniques. Les volcans historiquement actifs sont représentés par des triangles rouges et les plaques tectoniques par des lignes blanches. Source : Caprais, 2017.	3
Figure 2 : Représentation schématique de la formation des différents types de dynamisme éruptif : les éruptions effusives et les éruptions explosives et l'éjection de fragments de roche solide dans l'atmosphère. Source : Daffos, 2022.	4
Figure 3 : Carte d'iso masse de l'éruption de l'Etna en Italie. Source : Scollo et al., 2019.	8
Figure 4 : Photos des impacts typiques du téphra sur la végétation : oranger plié, branches cassées et choux enterrés après l'éruption de 2014 du Sinabung, Indonésie (A et B), piments endommagés par le téphra de l'éruption 2006 du volcan Merapi, Indonésie (C). Photos : volcanica, 2022 (A et B) et Wilson et al., 2007 (C).	11
Figure 5 : Photos des impacts physiologiques du téphra sur la végétation : feuilles de piment dépigmentées par le téphra (A), image MEB de téphra à l'intérieur d'un stomate sur l'épiderme inférieur d'une feuille de pommier après l'éruption de 1980 du Mt. Helens, USA (B) et coupe transversale (187X) d'une feuille de peuplier de Lombardie abrasée par le téphra, montrant l'élimination de l'épiderme et les dommages causés au mésophylle (C) Photos : Ligot et al., 2022 (A), Kennedy, 1980 (B) et Black et Mack, 1984 (C).	12
Figure 6 : Cadre d'évaluation des risques liés aux chutes des téphra sur les cultures. Source : Reuters et Russell J. 2017.	13
Figure 7 : Illustration visuelle présentant les divers stades de croissance du riz conformément à la classification BBCH, ainsi que la mise en évidence des phases sélectionnées pour les tests au cours de l'expérience. Source : FAO, 2003	18
Figure 8 : Photographie mettant en évidence le processus de détermination du stade d'amorçage chez les plantes de riz : repérage visuel du stade d'amorçage par l'apparition d'une fine extrémité semblable à un corset sur les feuilles (A) et formation des panicules au sein de la tige (B). ..	19
Figure 9 : Photographie mettant en évidence le stade de floraison atteint par la plante de riz.	19
Figure 10 : Illustration de la disposition des tests dans la serre. Les stades de développement sont codés par des couleurs : plantule (vert), tallage (bleu), amorçage (orange foncé), floraison (jaune). Les témoins sont représentées en orange clair.	20
Figure 11 : Photo illustrant le processus de germination, avec dix graines par pot disposées sur un lit d'eau. Cette photo montre la mise en place expérimentale où les conditions optimales ont été créées pour encourager la germination des plantules de riz.	21

Figure 12 : Photo illustrant le marquage (ligne blanche) délimitant de la panicule du reste de la plante. Cette démarcation permet une séparation précise lors des procédures de récolte et d'analyse.	22
Figure 13 : Photos du tamis d'une maille de 4 mm (A) et de l'épandeur de téphra utilisé pour appliquer le téphra sur la culture de riz (B), avec les bâches rigides aux extrémités. L'épandeur de téphra se compose d'un bac à téphra installé sur épandeur de sel roulant positionné à 1,5m au-dessus du sol.....	23
Figure 14 : Photographie illustrant la procédure de classification des épillets fertiles et vides. Cette image montre le processus de tri minutieux où les épillets sont examinés visuellement et classés en deux catégories distinctes : les épillets fertiles et les épillets vides.	26
Figure 15 : Diagramme illustrant la sélection des plantes exclues des bases de données. Les plantes mortes prématurément sont indiquées par une croix noire, tandis que les plantes qui n'ont pas réussi à se développer correctement sont marquées d'une croix rouge.....	27
Figure 16 : Plants de riz aux stades plantule (A), tallage (B), amorçage (C) et floraison (D). Photos des plants le jour de l'application de téphra pour les cinq charges testées : 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m ⁻² ainsi que du témoin. Pour l'échelle, un pot rouge a un diamètre de 16,4cm.	30
Figure 17: Photos montrant la rétention du téphra (20 kg m ⁻²) sur les feuilles des plantes aux stades plantule (A), tallage (B), amorçage (C) et floraison (D), cinq, 11 et 27 semaines après l'application du téphra. Des observations identiques sont faites pour les autres charges de téphra. Pour l'échelle, un pot rouge a un diamètre de 16,4cm.	31
Figure 18 : Évolution de la hauteur des plantes exposées à 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m ⁻² de téphra aux stades plantule, tallage, amorçage et floraison, et comparaison avec le témoin . Chacun des points représente la moyenne des valeurs obtenues pour chaque test. Les moyennes sont calculées à partir des données de 18 plantes à l'exception de certains tests où des plantes ont été exclues (cfr 4.5). Les zones plus transparentes indiquent les écarts-types respectifs.....	32
Figure 19 : : Évolution du nombre de feuilles des plantes exposées à 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m ⁻² de téphra aux stades plantule et tallage, et comparaison avec le témoin. Chacun des points représente la moyenne des valeurs obtenues dans chaque test. Les moyennes sont calculées à partir des données de 18 plantes à l'exception de certains tests où des plantes ont été exclues (cfr 4.5). Les zones plus transparentes indiquent les écarts-types respectifs.	33
Figure 20 : Évolution du nombre de panicules des plantes exposées à 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m ⁻² de téphra aux stades plantule, tallage, amorçage et floraison, et comparaison avec le témoin. Chacun des points représente la moyenne des valeurs obtenues dans chaque test. Les moyennes	

sont calculées à partir des données de 18 plantes à l'exception de certains tests où des plantes ont été exclues (cfr 4.5). Les zones plus transparentes indiquent les écarts-types respectifs. La ligne verticale noire indique le début du stade d'amorçage.	34
Figure 21: Box plots de la production du nombre de panicules (A) et du pourcentage de panicules fécondées (B) comme mesurés après la récolte des plantes de riz exposés à 0,5, 5, 10, 20, 40 kg m ⁻² de téphra aux stades plantule, tallage, amorçage et floraison, et comparaison avec le témoin. Les valeurs p du test de Dunnett pour un niveau de confiance de 95 % sont : (***) 0<p-value<0,001, (**) 0,001<p-value<0,01, (*) 0,01<p-value<0,05. Les losanges représentent les outliers.....	35
Figure 22 : Box plots de la production du nombre d'épillets (A) et du taux d'épillets fertile (B) comme mesurés après la récolte des plantes de riz exposés à 0,5, 5, 10, 20, 40 kg m ⁻² de téphra aux stades plantule, tallage, amorçage et floraison, et comparaison avec le témoin. Les valeurs p du test de Dunnett pour un niveau de confiance de 95 % sont : (***) 0<p-value<0,001, (**) 0,001<p-value<0,01, (*) 0,01<p-value<0,05. Les losanges représentent les outliers.....	36
Figure 23 : Box plots du poids sec des épillets (g) comme mesurés après la récolte des plantes de riz exposés à 0,5, 5, 10, 20, 40 kg m ⁻² de téphra aux stades plantule, tallage, amorçage et floraison, et comparaison avec le témoin. Les valeurs p du test de Dunnett pour un niveau de confiance de 95 % sont : (***) 0<p-value<0,001, (**) 0,001<p-value<0,01, (*) 0,01<p-value<0,05. Les losanges représentent les outliers.....	36
Figure 24 : Box plots du poids frais des plantes comme mesurés après la récolte des plantes de riz exposés à 0,5, 5, 10, 20, 40 kg m ⁻² de téphra aux stades plantule, tallage, amorçage et floraison, et comparaison avec le témoin. Les valeurs p du test de Dunnett pour un niveau de confiance de 95 % sont : (***) 0<p-value<0,001, (**) 0,001<p-value<0,01, (*) 0,01<p-value<0,05. Les losanges représentent les outliers.....	37
Figure 25 : Box plots des teneurs en potassium dans les racines (A), les tiges et les feuilles (B) et les épillets (C) des plantes de riz exposées à 0,5, 10 et 40 kg m ⁻² de téphra aux stades plantule et floraison, et comparaison avec les témoins. Les valeurs p du test de Dunnett pour un niveau de confiance de 95 % sont : (***) 0<p-value<0,001, (**) 0,001<p-value<0,01, (*) 0,01<p-value<0,05. Les losanges représentent les outliers.....	38
Figure 26 : Box plots des teneurs en calcium dans les racines (A), les tiges et les feuilles (B) et les épillets (C) des plantes de riz exposées à 0,5, 10 et 40 kg m ⁻² de téphra aux stades plantule et floraison, et comparaison avec les témoins. Les valeurs p du test de Dunnett pour un niveau de confiance de 95 % sont : (***) 0<p-value<0,001, (**) 0,001<p-value<0,01, (*) 0,01<p-value<0,05. Les losanges représentent les outliers.....	38

Figure 27 : Box plots des teneurs en silicium dans les racines (A), les tiges et les feuilles (B) et les épillets (C) des plantes de riz exposées à 0,5, 10 et 40 kg m ⁻² de téphra aux stades plantule et floraison, et comparaison avec les témoins. Les valeurs p du test de Dunnett pour un niveau de confiance de 95 % sont : (***) 0<p-value<0,001, (**) 0,001<p-value<0,01, (*) 0,01<p-value<0,05. Les losanges représentent les outliers.....	39
Figure 28 : Fonctions de fragilité illustrant la relation entre la perte de production moyenne (PPM) des épillets et de la paille et la charge massique de téphra appliqué sur les plants de riz aux stades plantule, tallage, d’amorçage et de floraison. La barre d'erreur représente l'intervalle de confiance à 95 %.....	45

Liste des tableaux

Tableau 1 : Minéraux présents dans un épillet de riz sec (INRAE, 2021)	17
Tableau 2 : Composition en bulk de la phonolite utilisée pour produire le substitut de téphra.	24

I. Introduction

Environ 1500 volcans sont connus sur notre planète, et chaque année, entre 40 et 50 d'entre eux entrent en éruption (GVP, 2013). Les éruptions volcaniques explosives émettent des matériaux qui, après dépôt, serviront à la formation de sols volcaniques fertiles (Shoji et al., 1993). Aujourd'hui, de nombreuses régions agricoles sont établies à proximité de volcans, une tendance qui s'accroît au fur et à mesure que la population mondiale croît. Cela entraîne une concentration croissante des productions agricoles dans ces zones volcaniques actives, stimulées par la fertilité de leurs sols riches (Craig, 2015). Toutefois, si les éruptions volcaniques et leurs produits permettent une agriculture productive, elles posent également un risque considérable pour le secteur (Lavigne et al., 2010 ; Craig, 2015). L'impact des éruptions volcaniques s'étend souvent à l'échelle locale, mais dans certains cas, celles-ci peuvent affecter des régions plus vastes et causer des pertes de rendement agricole à l'échelle régionale.

Parmi les régions volcaniquement actives, la zone volcanique méditerranéo-asiatique est particulièrement à risque d'éruptions et abrite une forte densité de population (Gertisser et al., 2018). Cette région est également responsable de 90% de la production mondiale de riz (FAO, 2018). Les cultures de riz occupent actuellement environ 15% des terres cultivées, soit près d'un quart de la totalité des surfaces céréalières (Trébuil, 2004). Avec la croissance de la population et les facteurs favorables tels que l'irrigation, les variétés à haut rendement et l'utilisation de produits agro-chimiques (López, 2023), la production de riz continue de croître, émergeant comme une source essentielle de nourriture pour plus de trois milliards de personnes (Trébuil, 2004). En raison de sa valeur commerciale élevée, toute perturbation de la production de riz a des répercussions importantes, affectant non seulement la disponibilité alimentaire, mais aussi l'équilibre économique à l'échelle mondiale (López, 2023).

Durant une éruption volcanique, l'intensité des chutes de téphra (dont font partie les cendres) et la vulnérabilité des cultures sont les facteurs qui déterminent la nature et la gravité des impacts (Lavigne et al., 2010). Il est donc essentiel de comprendre et de quantifier cette relation pour évaluer avec précision l'impact du téphra sur les cultures et mieux gérer les risques et les pertes de rendement agricole (Thompson et al., 2016). Actuellement, les modèles de prédiction de l'impact des cendres volcaniques reposent sur des fonctions de vulnérabilité intégrant les charges de cendres et les catégories de cultures, telles que les plantes à racines ou à feuilles, de manière générale (Craig et al., 2016). Néanmoins, ces modèles souffrent d'un manque de

données empiriques et de paramètre pris en compte, nécessitant souvent des évaluations d'experts (Jenkins et al., 2014). Il est donc essentiel d'augmenter la collecte de données afin d'améliorer la compréhension de l'impact et de la vulnérabilité des cultures de riz face aux dépôts de téphra. Cela inclut la considération du stade de développement des cultures pour enrichir les données existantes. Compte tenu de l'ampleur mondiale de la culture du riz et du manque quasi total d'informations à cet égard, cette étude contribuera significativement à fournir des données cruciales sur la vulnérabilité de la culture du riz face aux chutes de téphra.

II. Objectif

L'objectif principal de cette étude est d'apporter de nouvelles données sur la vulnérabilité d'une culture de riz exposée au téphra dans des conditions contrôlées. Afin d'atteindre cet objectif, nous cherchons à comprendre et quantifier la relation entre l'impact des matériaux éjectés par un volcan sur les cultures et les pertes de rendement agricole. Pour ce faire, nous avons choisi une culture de riz de variété IR29 et du cultivar *Oryza Sativa indica* pour une expérimentation en serre. Nous avons simulé la chute de téphra en appliquant différentes charges massiques de substitut de téphra sur la culture, à savoir 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻², des quantités typiques retrouvées après une éruption volcanique explosive (Biass, 2019). Ces simulations ont été réalisées à divers stades de développement du riz, notamment le stade paniculaire, le stade de tallage, le stade d'amorçage et le stade de floraison, afin de mieux appréhender l'impact selon les différentes phases de croissance.

III. État de l'art

3.1. Les volcans actifs

3.1.1. Localisation des volcans actifs

Les plaques tectoniques, de notre planète, peuvent donner naissance à des volcans à leurs frontières (Figure 1). Diverses zones volcaniques sont ainsi délimitées, comme celles au pourtour du Pacifique, aussi appelées la « ceinture de feu du Pacifique », ainsi que les zones volcaniques méditerranéo-asiatique, indienne, africaine et atlantique (Caprais, 2017). Parmi les 1500 volcans répertoriés, 500 sont actifs, et 80% d'entre eux se concentrent dans la « ceinture de feu du Pacifique ». Chaque année, entre 40 et 50 éruptions volcaniques sont enregistrées (GVP, 2013), dont 5 % se maintiennent en activité continue (Caprais, 2017).

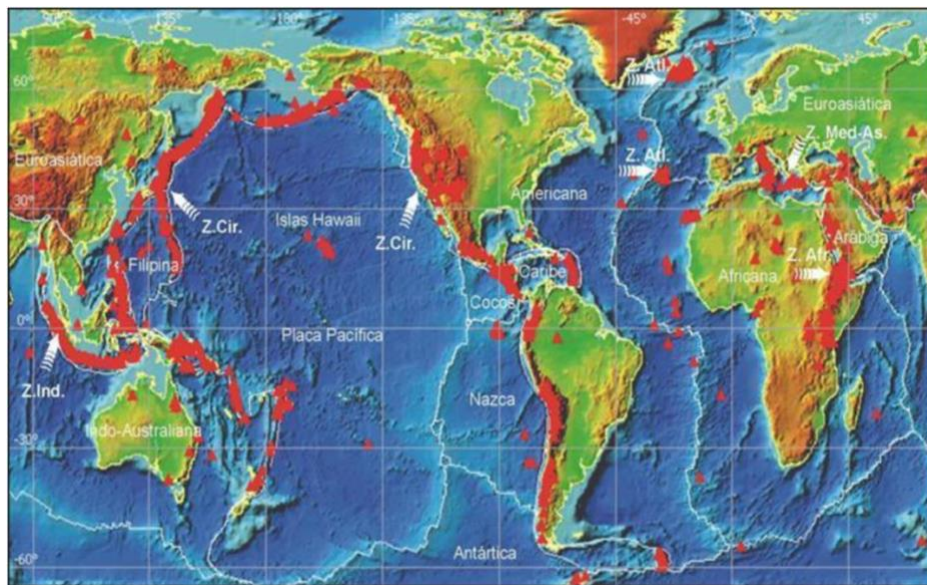


Figure 1: Distribution mondiale des volcans depuis l'Holocène et des principales plaques tectoniques. Les volcans historiquement actifs sont représentés par des triangles rouges et les plaques tectoniques par des lignes blanches. Source : Caprais, 2017.

3.1.2. Les éruptions volcaniques

Une éruption volcanique correspond à l'émergence de magma à la surface de la Terre. Cette émission peut prendre diverses formes, telles que des matériaux solides (pyroclastes) comme la cendre, les bombes volcaniques ou les blocs, des substances liquides comme la lave fluide, ou encore des gaz tels que le SO₂ et le CO₂ (Lavigne et al., 2010).

Lorsque le magma dans la croûte terrestre s'achemine vers la surface, la pression qui l'entoure diminue progressivement. Cela entraîne l'exsolution de composés volatils dissous dans le magma, principalement de l'eau et du CO₂, ainsi que de petites quantités de soufre, de chlore et de fluor, et la formation de bulles de gaz. L'apparition de ces bulles diminue la densité du

magma, favorisant ainsi sa remontée. La diminution de pression qui accompagne l'ascension du magma favorise l'expansion des bulles de gaz (Daffos, 2022). Si le magma est relativement peu visqueux, le gaz peut éventuellement s'échapper de manière non explosive. Par contre, dans des magmas très visqueux, le gaz ne pourra être libéré que par la rupture brutale du magma sous l'effet de la pression excessive exercée par les bulles de gaz en expansion (Kushnir et al., 2017). La viscosité d'un magma augmente avec le contenu en silice (SiO_2) et diminue avec la température et la teneur en eau (Qaddah, 2020). Le style éruptif (Figure 2) est fortement conditionné par la dynamique du dégazage des magmas. Ainsi, les éruptions effusives qui produisent des coulées de lave sont alimentées par des magmas qui ont perdu une grande partie de leurs gaz avant d'atteindre la surface. En revanche, les éruptions explosives résultent de l'expulsion violente de gaz causée par la fragmentation du magma à proximité de la surface (Lavigne et al., 2010). Elles produisent une colonne éruptive constituée d'un mélange de gaz et de fragments de magma avec des tailles variées. Le téphra, c'est-à-dire des fragments de magma solidifié < 64 mm en taille, est le produit principal des éruptions explosives. L'état du produit émis et la dynamique éruptive dépendent donc des conditions environnementales, comme la pression et la température, lors de l'éruption volcanique, mais surtout de la proportion de silice présente dans leur magma (Bernard et al., 2011).

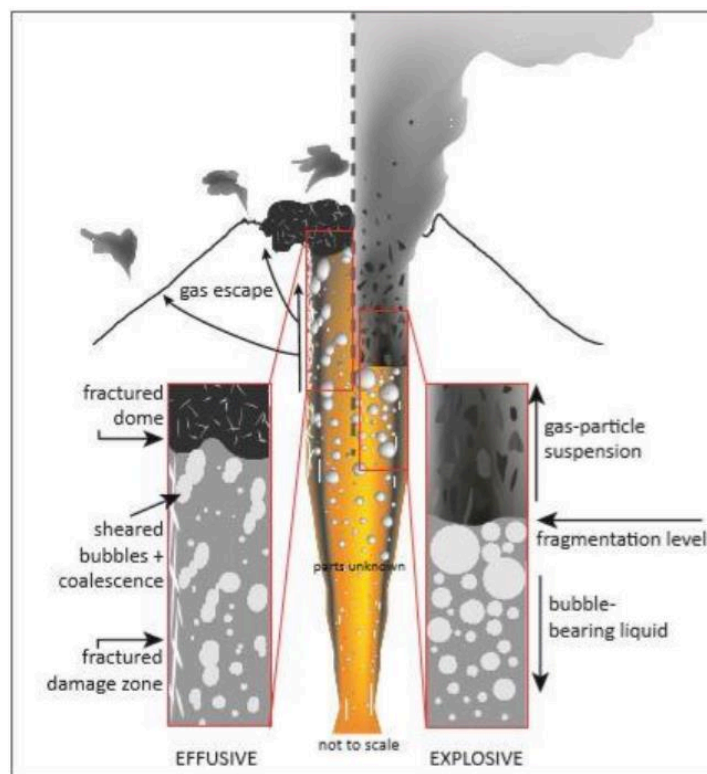


Figure 2 : Représentation schématique de la formation des différents types de dynamisme éruptif : les éruptions effusives et les éruptions explosives et l'éjection de fragments de roche solide dans l'atmosphère. Source : Daffos, 2022.

On classe les magmas en fonction de leur contenu en SiO_2 . Les magmas mafiques (basaltiques) sont pauvres en SiO_2 ($\leq 57\%$ en poids) et riches en aluminium, fer et magnésium. Les magmas intermédiaires (andésitiques et dacitiques) contiennent entre 57% et 77% en poids de SiO_2 , tandis que les magmas siliciques (rhyolitiques) ont des contenus en $\text{SiO}_2 > 70\%$ en poids (Irvine et al., 1971).

La réactivation d'un volcan peut être surveillée, mais prédire l'éruption, sa durée, son dynamisme demeure hors de portée des volcanologues. Ceci complique la gestion des crises volcaniques et des risques associés (Daffos, 2022). Pour quantifier la magnitude des éruptions, ils ont fait appel à un indice d'explosivité volcanique (VEI). Cet indice logarithmique varie de 0 à 8, où 0 est le minimum (non explosif) et 8 est le maximum. Il décrit le volume de fragment de roche solide éjecté dans l'atmosphère et la hauteur de la colonne éruptive (Newhall et al., 1982).

3.1.3. Le téphra

Le terme « téphra » a été introduit dans la littérature scientifique par S. Thorarinsson en 1944 pour décrire l'ensemble des pyroclastes de tous types, tailles et formes confondues, qui sont éjectés lors d'un événement volcanique dans l'air (Arnalds, 2013).

3.1.3.1. Formation du téphra

Le téphra se forme par différents processus physiques dont le plus important est la fragmentation des magmas. Ce phénomène surgit de l'éclatement des bulles de gaz surcomprimées, emprisonnées dans le magma. Ces bulles se forment en réaction à la réduction de pression provoquée par la montée du magma depuis les profondeurs, ainsi qu'à l'accélération rapide du magma due aux forces de cisaillement (Zimanowski et al., 2003). Parmi les autres processus de formation, on peut citer l'érosion d'anciennes roches lorsque le magma remonte à la surface ou encore l'abrasion de fragments plus gros dans le panache éruptif du volcan (McGuire, 2003).

3.1.3.2. Propriétés physico-chimiques du téphra

Les téphra incluent les cendres volcaniques dont la taille est $< 2 \text{ mm}$ (Bernard et al., 2011). Les caractéristiques physico-chimiques du téphra dictent sa réactivité une fois déposée dans l'environnement. Celles-ci incluent notamment la distribution de taille des particules, leur couleur et leurs compositions minéralogique et chimique globales et de surface (Craig, 2015).

Les particules plus fines développent une surface spécifique plus grande que les particules plus grossières, ce qui rend les premières potentiellement plus réactives. La surface spécifique peut également être influencée par la porosité et la texture de surface des particules (Lowell et al., 2004). La composition minéralogique des téphra est déterminée par la composition du magma dont ils dérivent. En fonction de la composition du magma, on retrouvera en plus du verre aluminosilicaté dominant, des minéraux primaires comme les feldspaths, les pyroxènes, les amphiboles, les olivines et des oxydes de fer/titane (Quant, 1972). La couleur du téphra dépend des teneurs en métaux de transition ainsi que de la taille des particules. Une teneur élevée en fer et une faible teneur en silicium donneront une couleur foncée au téphra. À l'inverse, une faible teneur en fer et une forte teneur en silicium donneront une couleur pâle au téphra (Scholze, 1990). L'altération chimique peut modifier la couleur du téphra, et sa teneur en eau influencera aussi sa réflectance (Tian et al., 2015). De sels de sulfatés, chlorés et fluorés sont souvent présents à la surface des téphra. Ceux-ci résultent de réactions chimiques entre la surface des particules et les gaz/condensats de gaz volcanique au sein de la colonne éruptive et/ou du panache volcanique qui se disperse dans l'atmosphère. Les sels peuvent jouer un rôle déterminant dans la réactivité chimique des téphra (Ayrís et al., 2012).

3.1.3.3. Dispersion et dépôt du téphra

La colonne éruptive composée de gaz et de téphra à haute température s'élève verticalement dans l'atmosphère en se refroidissant. Une fois l'équilibre thermique avec l'air ambiant atteint, elle pourra être dispersée horizontalement par les vents dominants. On parlera alors d'un panache ou d'un nuage volcanique (Saxby et al., 2018). Au cours du transport dans l'atmosphère, les téphra vont progressivement sédimenter pour former des dépôts au sol. La dispersion et le dépôt de téphra sont conditionnés essentiellement par les caractéristiques physiques de la colonne éruptive, les conditions météorologiques et la topographie locale, ainsi que par la taille et la densité des particules (Froggatt et al., 2012, Lavigne et al., 2010). La densité du dépôt de téphra est influencée par la composition, la taille et la teneur en gaz du magma. Elle varie généralement entre 0.2 et 3.5 g cm⁻³ (Bernard et al., 2011). En fonction du VEI de l'éruption explosive, les dépôts de téphra peuvent affecter des surfaces variant de quelques kilomètres carrés à plusieurs centaines de milliers de kilomètres carrés pour les plus grandes éruptions. Les particules fines et moins denses, comme les cendres volcaniques, peuvent rester en suspension dans l'atmosphère, entraînant des retombées à distance, tandis que les particules plus grosses et plus denses, telles que les blocs volcaniques, retombent généralement près du volcan (Saxby et al., 2018). En effet, lors d'éruptions puissantes, les

bombes volcaniques atterrissent généralement jusqu'à 5 km du cratère, et le téphra peut être déposé à plus de 2 000 km de la source (Krystyna Brown et al., 2015). Cela a notamment été le cas pour la super-éruption du Lava Creek au Yellowstone, aux États-Unis (Izett et al., 1982). L'épaisseur du dépôt diminue avec la distance au volcan, les retombées étant plus proches du cratère et dispersées par le vent. Typiquement, l'impact environnemental se limite à moins de 50 km de la source (Delmelle, 2003).

L'accumulation de téphra sur le sol est généralement exprimée par une épaisseur, ou par une charge massique de téphra par unité de surface (kg m^{-2} ; Rosi, 1993). Cette charge peut être calculée à partir de l'épaisseur en prenant en compte la densité apparente du dépôt (exprimée kg m^{-3}). Celle-ci varie selon la compaction du dépôt et le taux d'humidité. En supposant une densité de dépôt de téphra de 1000 kg m^{-3} , des seuils de charge de masse de téphra de 1 kg m^{-2} , 5 kg m^{-2} et 100 kg m^{-2} correspondraient à des épaisseurs de dépôt de $\sim 1 \text{ mm}$, $\sim 5 \text{ mm}$ et $\sim 100 \text{ mm}$, respectivement (Eychenne et al., 2012, Jenkins et al., 2022).

En raison de la possibilité d'une dispersion étendue des téphra sur de vastes distances, la prévision de leur trajectoire et l'évaluation des zones susceptibles d'être touchées par une éruption revêtent un intérêt considérable (Lavigne et al., 2010). Pour accomplir cela, des modèles de dispersion et de sédimentation du téphra sont utilisés (Bonadonna, 2005). Ces modèles sont utilisés pour prédire la distribution spatiale du dépôt et dresser des cartes d'iso-masses de celui-ci (Figure 3). Les cartes d'iso-masses, représentant la distribution des téphras émis lors d'une éruption volcanique, peuvent être transformées en cartes d'iso-épaisseurs des dépôts. Cette conversion facilite l'estimation de l'exposition potentielle aux téphras dans différentes régions en décrivant la répartition des dépôts (Scollo et al., 2019). Les cartes d'isopaches, spécifiques à une épaisseur donnée, sont utilisées pour délimiter les zones de dépôt caractéristiques, permettant de visualiser la variation de l'épaisseur de la couche de téphra en fonction de la distance par rapport au volcan éruptif (Mecklenburg, 2005).

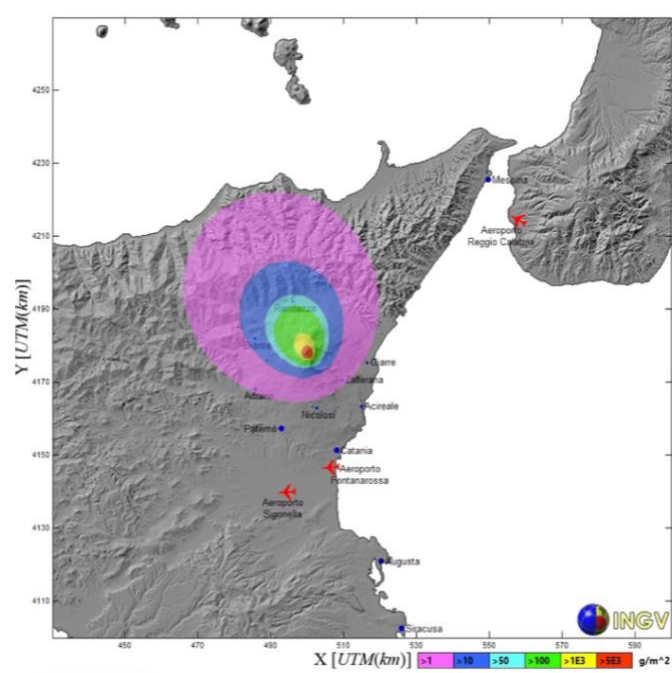


Figure 3 : Carte d'iso masse de l'éruption de l'Etna en Italie. Source : Scollo et al., 2019.

3.2. L'agriculture aux abords des volcans actifs

3.2.1. Caractéristique et formations des sols volcaniques

Les sols volcaniques, pour la plupart des Andosols, se forment à partir de matériaux d'origine volcanique. La plupart des sols volcaniques sont dérivés de dépôts de téphra. En général, ces sols présentent une excellente fertilité physique et chimique et ils montrent un fort potentiel agronomique. Ils sont en effet parmi les sols les plus productifs au monde et fournissent des ressources alimentaires à environ 10 % de la population mondiale (Shoji et al., 1993).

Les Andosols, en tant que sols volcaniques, se caractérisent par un horizon supérieur riche en matière organique (FAO, 2018). Leur capacité d'échange cationique (CEC) varie entre 20 et plus de 50 cmolc kg⁻¹ à pH 7, avec une valeur typique de 3,5 à 20 cmolc kg⁻¹ à pH 7 (FAO, 2018). Ils présentent également une haute capacité de rétention d'eau en raison de la formation de capillaires dans leur structure, ce qui conduit à une faible densité apparente (< 0.9 g cm⁻³) et à une porosité élevée. Comme pour d'autres sols, le climat exerce une influence majeure sur la formation des sols volcaniques. Dans les climats équatoriaux où les précipitations sont abondantes (plus de 4 m d'eau par an), les verres volcaniques sont rapidement météorisés, libérant ainsi des nutriments essentiels à la croissance des plantes.

3.2.2. Interactions entre la démographie, l'agriculture et les zones volcaniques actives

Plus de 800 millions de personnes résident à moins de 100 km d'un volcan qui a été actif durant l'Holocène (la période actuelle qui débuta il y a environ 11700 ans). Ces populations se sont établies dans ces régions pour diverses raisons, mais principalement en raison des opportunités agricoles qu'elles offrent. La répartition des sols volcaniques, fertiles, coïncide avec la distribution des volcans (Figures 1 et 4). Les communautés établies autour des volcans peuvent répondre à leurs besoins grâce à l'agriculture (Stassart, 2022).

Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), les secteurs agricoles dans les pays en voie de développement subissent environ 23 % du total des dommages et des pertes résultant des catastrophes naturelles. Parmi ces catastrophes, les éruptions volcaniques se classent au deuxième rang en termes de préjudice, contribuant à 30 % des pertes agricoles dans les domaines de l'agriculture, de l'élevage, de la foresterie, de la pêche et de l'aquaculture (FAO, 2021). La proximité des terres agricoles avec les volcans et la capacité limitée du secteur agricole à absorber les pertes occasionnées par les éruptions volcaniques exposent cette activité à une vulnérabilité accrue face aux aléas volcaniques. En cas d'éruption, les émissions de téphra peuvent affecter fortement la qualité et la quantité des récoltes, entraînant d'importantes pertes économiques et parfois des pénuries alimentaires (Lavigne et al., 2010). Cette situation s'est notamment produite autour du Merapi, Indonésie à la suite de l'éruption de 2010, qui a causé d'importantes pertes dans le secteur agricole, notamment pour les cultures de tomates, de piments, de maïs et de tabac (Picqout, 2015).

3.2.3. Impacts du téphra sur les cultures

Une fois déposés sur le sol, les téphra ont un effet bénéfique à long terme sur la fertilité du sol. Cela provient des processus d'altération chimique qui introduisent une nouvelle source de nutriments (notamment, le potassium, le calcium et le phosphore) facilement disponibles pour les végétaux. Cependant, à court terme, les téphra peuvent causer des dommages plus ou moins importants aux cultures (Arnalds, 2013). Ceux-ci peuvent être d'ordres mécanique, chimique et physiologique (Craig, 2015). Les impacts des téphra sur les cultures dépendront de leurs caractéristiques, telles que la taille, la composition chimique, la couleur et les propriétés de surface des grains, ainsi que l'épaisseur du dépôt (Wang et al., 2010). Plusieurs facteurs non volcaniques modulent les impacts négatifs des téphra, notamment les conditions météorologiques, le type de culture, la saison, etc. La capacité de survie des plantes dépend de plusieurs facteurs, notamment la profondeur d'enfouissement des particules de téphra, la

hauteur de la végétation, la fréquence des dépôts, la composition de la végétation environnante et la réactivité de la plante face à ces perturbations (Arnalds, 2013).

3.2.3.1. Impact mécanique du dépôt de téphra sur les cultures

Les impacts mécaniques des téphra sur les plantes sont souvent les plus dommageables et ils conduisent à des impacts physiologiques, principaux contributeurs aux baisses de rendement (Craig, 2015). Ces impacts résultent principalement de l'accumulation excessive de téphra sur les plantes qui peut entraîner leur enfouissement, l'étouffement et l'abscission des feuilles et des fruits (Figure 4 A, B et C) (Craig, 2015). Ces dommages s'intensifient avec l'augmentation de la charge de téphra (Miller, 1967), bien que parfois un seuil de 0,5 kg/m² de téphra puisse suffire pour déclencher ces effets (Ligot et al., 2022). Des études ont démontré que l'épaisseur du téphra (ou la charge) a un impact significatif sur le rendement des cultures. Par exemple, pour une culture de riz, un dépôt de 50 mm entraîne une perte de plus de 50 % de la récolte, tandis que des dépôts de 100 mm et 200 mm conduisent à une perte totale de la récolte (Jenkins et al., 2014). Cette relation est corroborée par plusieurs recherches, notamment celles concernant l'éruption de Ksudach en 1907 en Alaska. Cette étude a révélé qu'un dépôt de 100 cm de téphra anéantissait la végétation, alors que des dépôts inférieurs à 10 cm causaient des dommages sans éradiquer les espèces (Arnalds, 2013). Des conclusions similaires ont été tirées de l'éruption de Paricutin en 1943 au Mexique, où un dépôt de 15 à 50 cm de téphra entraînait une survie partielle de la végétation (Inbar et al., 1994). Par ailleurs, les dépôts de téphra peuvent causer des dommages mineurs, tels que des abrasions des tissus provoquées par le frottement des particules et surtout lors de la remobilisation par le vent dans des environnements secs. Cela peut affaiblir les tissus des végétaux (Arnalds, 2013) et créer un environnement favorable à l'installation de pathogènes ou à la perte d'eau, conduisant ainsi au dessèchement des feuilles (Cook et al., 1981). Ce phénomène est influencé par des facteurs extérieurs tels que le vent, qui peut éliminer les particules de téphra des plantes, réduisant ainsi leur temps de résidence mais il peut également causer des abrasions en faisant frotter les particules contre les tissus végétaux (Antos et al., 1986). Des effets similaires ont été observés après l'éruption de 1943 au Paricutin (Rees, 1979). L'abrasion des particules de téphra est conditionnée par plusieurs facteurs, dont la taille, la forme et la dureté du téphra (Riley et al., 2003). En général, les particules plus grossières et anguleuses sont plus susceptibles d'être abrasives. Les particules fines ont tendance à être plus facilement retenues sur les surfaces foliaires en raison de leur petite taille (Ligot et al., 2022). D'autres facteurs externes comme l'eau influenceront également

l'impact du téphra sur la culture, puisqu'elle peut emporter le téphra des plantes, mais également augmenter leur poids total, entraînant davantage de ruptures ou de réactions chimiques.

Enfin, le dépôt de téphra sur le sol peut également nuire aux plantations. Les propriétés hydrauliques du dépôt influencent les échanges d'eau et de gaz entre le sol sous-jacent et l'atmosphère, avec des répercussions potentiellement négatives pour la plante. La cimentation partielle du dépôt pourra réduire considérablement l'infiltration d'eau dans le sol (Craig, 2015).

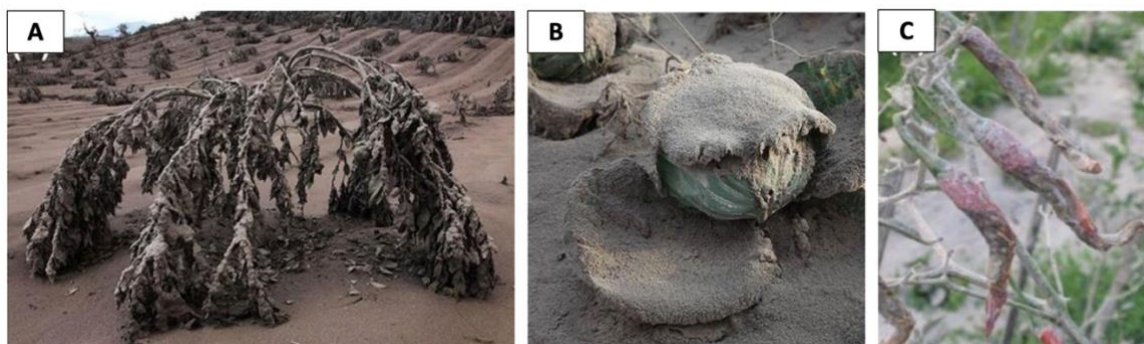


Figure 4 : Photos des impacts typiques du téphra sur la végétation : oranger plié, branches cassées et choux enterrés après l'éruption de 2014 du Sinabung, Indonésie (A et B), piments endommagés par le téphra de l'éruption 2006 du volcan Merapi, Indonésie (C). Photos : volcanica, 2022 (A et B) et Wilson et al., 2007 (C).

3.2.3.2. Impact chimique du dépôt de téphra sur les cultures

Les conséquences chimiques du dépôt de téphra sur les parties aériennes des plantes sont principalement liées à son acidité. Cette acidité peut entraîner des « brûlures » chimiques, particulièrement au niveau de la cuticule des feuilles. Cela rend le feuillage plus sensible à la sécheresse et à la dessiccation, augmentant ainsi la susceptibilité de la plante à la nécrose. Ces brûlures peuvent également entraîner des pertes d'éléments nutritifs essentiels tels que le calcium, le magnésium et le potassium, en raison d'échanges ioniques (Adams, 1987). De plus l'acidité peut modifier la surface protectrice cireuse des feuilles, en abaissant la résistance aux maladies, inhiber la germination des plantes et la reproduction (Picquout., 2015). Ces dégâts peuvent être amplifiés en période sèche lorsque les téphra restent collés aux plantes après les chutes et que la condensation due aux rosées matinales augmente l'acidité des téphra sans les éliminer (Picquout, 2015). En ce qui concerne les impacts chimiques indirects des téphra sur les cultures via une modification des propriétés des sols, on citera dans de rares cas, une baisse du pH du sol qui pourrait endommager l'apex racinaire des plantes (Craig, 2016), accélérer l'altération des sols, réduire les concentrations des nutriments essentiels (Picquout, 2015). La perte de nutriments essentiels peut réduire la croissance des plantes ou diminuer l'activité microbienne du sol (Craig, 2015). La grande surface spécifique des particules fines peut également les rendre plus réactives chimiquement (Lowell et al., 2004).

3.2.3.3. *Impact physiologique dépôt de téphra sur les cultures*

Pour finir, les impacts physique et chimique débouchent sur des impacts physiologiques qui se traduisent par une perte d'efficacité de la photosynthèse. Cela peut entraîner des retards ou des accélérations de croissance, la mort de la plante (Sword-Daniels, 2015), des changements dans sa structure ou son enracinement (Smith et al., 2010). La diminution de la capacité photosynthétique résulte de la réduction de la surface foliaire exposée à la lumière solaire, causée par le dépôt de téphra sur les feuilles. Par exemple, un dépôt de 10 g m^{-2} de téphra a entraîné une réduction de près de 98% de l'activité photosynthétique des aiguilles de pin (Hinckley et al., 1984). Les manifestations caractéristiques des dommages induits par la présence de téphra à la surface des feuilles comprennent une diminution de l'arrivée de lumière et le développement de chlorose. Ces effets se traduisent par des taches jaunâtres sur les feuilles, le recourbement des bords des feuilles et le dessèchement des plantes. Dans certains cas, les particules de téphra peuvent obstruer les stomates, perturbant ainsi les échanges gazeux et nuisant à la photosynthèse (Figure 5) (Hinckley et al., 1984). De plus, la photosynthèse peut également être réduite en raison des zones brûlées résultant d'impact chimique (Smith et al., 2010). Enfin, la couleur du téphra influe sur son interaction avec le rayonnement électromagnétique, déterminant l'absorption et la réflexion de la lumière, ce qui, en fonction de l'albédo, peut entraîner une modification de la température du sol (Burns, 1970; Cook et al., 1981). Par exemple, une étude a enregistré une augmentation de $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ de la température des feuilles de concombre recouvertes de $1,2 \text{ g m}^{-2}$ de poussière de carbone noir (Hirano et al., 1995). Cela a un impact sur la photosynthèse, favorise l'augmentation de la transpiration et réduit l'efficacité de l'utilisation de l'eau par les plantes (Stanhill, 1986).

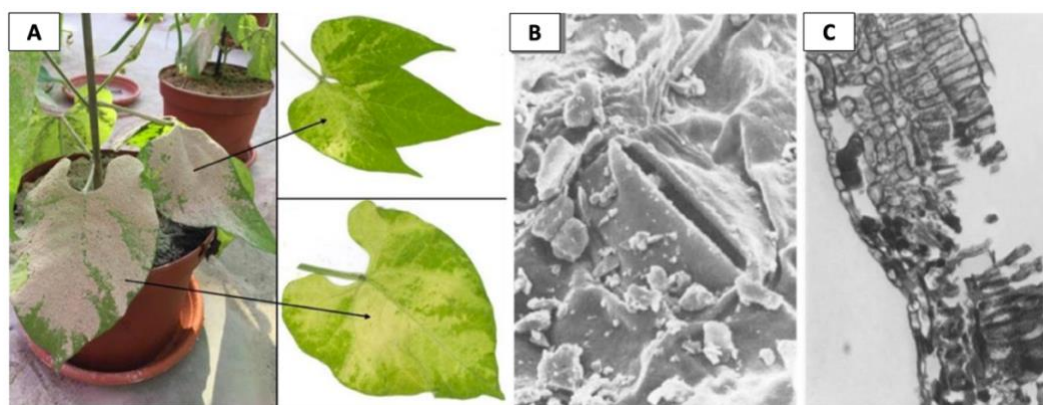


Figure 5 : Photos des impacts physiologiques du téphra sur la végétation : feuilles de piment dépigmentées par le téphra (A), image MEB de téphra à l'intérieur d'un stomate sur l'épiderme inférieur d'une feuille de pommier après l'éruption de 1980 du Mt. Helens, USA (B) et coupe transversale (187X) d'une feuille de peuplier de Lombardie abrasée par le téphra, montrant l'élimination de l'épiderme et les dommages causés au mésophylle (C) Photos : Ligot et al., 2022 (A), Kennedy, 1980 (B) et Black et Mack, 1984 (C).

3.3. Risque des retombées du téphra sur les cultures

Le risque peut être défini comme la probabilité de conséquence négative due à un événement dangereux. L'analyse des risques constitue ainsi une démarche visant à quantifier les conséquences d'un événement potentiellement dangereux sur les systèmes impactés et les communautés dépendantes (Desroches, 2013). Cette approche relie les caractéristiques du danger, de l'exposition et de la vulnérabilité (Desroches, 2013), et peut être résumée par la Figure 6 .



Figure 6 : Cadre d'évaluation des risques liés aux chutes des téphra sur les cultures. Source : Reuters et Russell J. 2017.

Une approche probabiliste est adoptée dans cette analyse pour communiquer les probabilités associées au scénario dangereux considéré. La création de modèles de risques quantitatifs pour l'agriculture revêt une importance cruciale, car elle permet de fournir une alerte précoce en cas de situation critique, anticipant ainsi les pertes de production ou de productivité des cultures. Cela se traduit par la conception de stratégies préventives ou d'atténuation post-éruption, telle que la planification de l'utilisation des terres, la récolte précoce des cultures, la construction de bâtiments résilients, etc. Et ainsi protéger les populations et les infrastructures vulnérables (Lavigne et al., 1994, Craig et al., 2021). Les aléas désignent les phénomènes naturels potentiellement dommageables, qui sont définis dans l'espace et le temps. Les aléas volcaniques peuvent revêtir une multiplicité de formes, pouvant parfois se produire de manière combinée ou échelonnée dans le temps, créant ainsi une dynamique spatiale et temporelle complexe. Pour illustrer les divers aléas auxquels les différentes zones géographiques entourant un volcan peuvent être exposées, le VEI peut être pris en considération. De plus, les outils utilisés pour évaluer l'exposition des téphra incluent les cartes d'isomasses et d'isopaches afin de mettre en évidence différents scénarios d'exposition. L'exposition de tout élément, qu'il s'agisse d'une culture, d'une personne, d'un bâtiment ou d'un système, est intrinsèquement liée à sa présence physique dans la zone à risque. Par conséquent, il est essentiel d'examiner où se trouvent les cultures.

3.3.1. Vulnérabilité des cultures due aux aléas volcaniques

3.3.1.1. *Vulnérabilité des cultures et fonction de fragilité*

La vulnérabilité d'une culture exposée aux retombées de téphra est influencée par la phénologie de la plante, intégrant des facteurs tels que la physiologie, la morphologie, le stade de croissance, la résistance, la sensibilité aux phases de croissance, ainsi que le type et la taille des plantes, jouant un rôle déterminant dans leurs réactions (Blake, 2015). En effet, les arbres ont tendance à mieux résister à des quantités équivalentes de téphra que les buissons ou les plantes plus petites. L'impact des téphra varie en fonction de la partie spécifique de la plante qui y est exposée, par exemple, les feuilles sont plus sensibles que les racines (Rose et al., 2008). La vulnérabilité des plantes est accentuée lorsque le moment de l'éruption coïncide avec des phases clés de la phénologie de la culture (Ligot et al., 2022). La vulnérabilité de chaque culture face à un risque comme un dépôt de téphra après une éruption volcanique dépend de plusieurs facteurs interconnectés. Ces éléments, faisant partie d'un système complexe, interagissent entre eux de manière à amplifier ou atténuer les effets du risque. De plus, la vulnérabilité d'une culture peut varier en fonction de l'heure du jour ou de la saison (Blong et al., 2017).

Dans le domaine des risques naturels, l'évaluation de la vulnérabilité a été appréhendée à travers un éventail de méthodes, allant des descriptions qualitatives jusqu'à l'utilisation de fonctions de fragilité quantitatives. Parmi ces approches, la fonction de fragilité est considérée comme un des outils le plus appropriés pour quantifier la vulnérabilité des cultures. Elle représente la relation entre l'intensité de l'aléa et l'impact qui en découle, notamment les pertes de production ou de productivité dans le contexte des cultures (Craig et al., 2021). Elles déterminent la probabilité qu'un certain niveau d'impact, caractérisé par une perte de production, soit atteint ou dépassé. Les fonctions de fragilité, basées sur diverses échelles liées à la charge des téphra, sont principalement développées de manière semi-quantitative (Blong, 2003). Afin de les établir, il faut définir qualitativement et quantitativement les données d'observation ainsi que les états d'impact ou de dommage. Ces fonctions sont spécifiquement conçues pour des groupes de cultures. Certains classent les cultures en fonction de leur hauteur ou de leur partie comestible, afin d'évaluer leur vulnérabilité. D'autres segmentent l'horticulture en catégories telles que légumes-feuilles, légumes-fruits, cultures-racines, cultures arboricoles et viticulture (Wilson et al., 2007). Une autre approche divise les plantes en petites plantes herbacées et lianes, plantes à tubercules et légumes, plantes graminoides et plantes herbacées plus hautes, petits arbres et arbustes, et arbres et palmiers (Bignami et al., 2012). En outre, certaines classifications distinguent les cultures au sol, les cultures arboricoles et les rizières (Jenkins et

al., 2014), tandis que d'autres considèrent des catégories telles que cultures de fruits non arboricoles, cultures de fruits arboricoles, légumes-feuilles, céréales, légumes-racines, viticulture et rizières (Craig, 2015). Les études post-éruptions (post-EIA) sont utilisées pour recueillir des informations sur les conséquences des éruptions, les risques posés par les téphra et la vulnérabilité des cultures. Ces données guident ensuite les modèles d'analyse de la vulnérabilité et du risque (Craig, 2015). Cependant, les informations sur la vulnérabilité des cultures face au téphra sont souvent limitées, principalement en raison de la nature dangereuse, imprévisible et parfois lointaine des éruptions volcaniques, en plus de la relative nouveauté de cette discipline. Pour pallier ces lacunes, les avis d'experts sont utilisés et des échelles d'évaluation des dommages sont développées (Wilson et al., 2007).

3.3.1.2. Incertitude et lacunes des connaissances

Encore aujourd'hui, l'impact des éruptions volcaniques est peu étudié par les chercheurs. Les études existantes se basent généralement sur des données recueillies après l'éruption. Les fonctions de fragilité spécifiques aux cultures de riz face aux chutes de téphra sont rares et présentent des lacunes, des incertitudes et des limites (Lacharme, 2001 ; Wilson et al., 2007 et Picquout, 2015). Ces limitations comprennent le manque de données sur le terrain, le nombre limité d'études disponibles, l'absence de données expérimentales (seulement des données d'interview), ce qui entraîne des approximations et l'absence d'évaluation de l'erreur (Jenkins et al., 2014). L'absence de données pose un obstacle à l'élaboration d'une approche probabiliste visant à évaluer l'incertitude entourant la fonction de fragilité des cultures. Cependant, c'est d'une grande importance car le fait de mesurer et d'évaluer les incertitudes est fondamental pour prévoir les résultats possibles des catastrophes et pour communiquer ces informations aux personnes qui prennent des décisions ainsi qu'à la population exposée. Ensuite, la principale manière d'évaluer l'intensité du danger, qui affecte l'ampleur de l'impact sur les cultures, est basée sur la quantité de téphras qui s'accumule au sol, que ce soit en termes d'épaisseur ou de poids total de téphras (Craig, 2015). Néanmoins, d'autres éléments, à la fois d'origine volcanique (comme la dimension des grains de téphra ou la composition de la surface) et non volcanique (comme les conditions environnementales, les caractéristiques des plantes, le stade de développement, caractéristiques génétiques et physiologiques des cultures, intensité de l'agriculture, le type d'exploitation spécifique, la notion de temps, etc), exercent une influence majeure dans la manière dont l'impact sur les cultures est déterminé et comment leur vulnérabilité au téphra est façonnée (Jenkins et al., 2014; Craig et al., 2021). De plus, on considère que les chutes de téphra se produisent en un épisode court et distinct, sans prendre en

compte d'éventuelles chutes supplémentaires (Wilson et al. 2011). Ces paramètres sont souvent oubliés et pourtant, ils influencent le degré de perte de culture et engendrent donc une prédiction de l'impact inexacte.

Il existe des lacunes dans l'estimation des risques volcaniques qui nécessitent des améliorations techniques. Ce travail vise à combler ces lacunes en fournissant des données de vulnérabilité pour les cultures de riz confrontées à des chutes de téphra de différentes épaisseurs, en apportant des informations sur les impacts et en approfondissant la compréhension des mécanismes d'impact à travers un suivi hebdomadaire et en fin de récolte.

IV. Matériels et méthodes

L'analyse du risque est complexe, avec de nombreux paramètres et variabilités à prendre en compte. Pour simplifier l'analyse, cette étude quantifie la vulnérabilité d'une catégorie spécifique de biens ou d'actifs (plantes de riz à différents stades phénologiques) exposée à un seul type d'événement volcanique (chute de téphra). En suivant cette approche, on simplifie la complexité du risque en intégrant les actions visant à réduire les impacts dans l'évaluation de la vulnérabilité de ces actifs.

4.1. Matériel végétal

Pour notre expérience, nous avons choisi de travailler avec la variété de riz IR29 (cultivar : *Oryza Sativa indica*). Cette variété est couramment cultivée dans des régions volcaniques comme l'Indonésie et les Philippines (FAO, 2018). La variété IR29, développée par l'International Rice Research Institute (IRRI) en 1960 (Couubaly, 1999) est plus courte que les variétés traditionnelles, ce qui la rend moins susceptible de verser. Elle est réputée pour son haut rendement et sa résistance à certaines maladies, la rendant populaire parmi les agriculteurs (Kruasuwan et al., 2023). Caractérisée par un cycle court, cette variété atteint généralement la maturité en environ 110 à 120 jours après la transplantation, présentant une stature moyenne avec des feuilles larges et une tige droite (Couubaly, 1999). Pour notre étude, nous nous concentrons spécifiquement sur la composition minérale du riz (Tableau 1).

Tableau 1 : Minéraux présents dans un épillet de riz sec (INRAE, 2021)

Paramètre	Sec	Unité
Calcium	0.7	g/kg
Phosphore	2.8	g/kg
Phosphore phytique	2.3	g/kg
Magnésium	1.7	g/kg
Potassium	3.1	g/kg
Sodium	0.28	g/kg
Chlore	0.3	g/kg
Soufre	0.5	g/kg
Bilan cations-anions	54	mEq/kg
Bilan électrolytique	83	mEq/kg
Manganèse	78	mg/kg
Zinc	20	mg/kg
Cuivre	6	mg/kg
Fer	18	mg/kg
Sélénium	0.2	mg/kg
Cobalt	2	mg/kg
Molybdène	0.9	mg/kg
Iode	0.03	mg/kg

Le cycle végétatif du riz se divise en dix stades distincts, regroupés en trois phases de développement, conformément à la classification BBCH (Karuga, 2022, Bass, 2017, Meier, 2001) :

- Phase végétative : stade de germination, stade de plantule, stade de tallage, stade d'élongation
- Phase reproductive : stade d'initiation paniculaire, stade d'amorçage, stade de floraison
- Phase de maturation : stade laiteux, stade de grain pâteux, stade de maturation

Les stades plantule, tallage, amorçage et floraison ont été ciblés dans nos expériences (Figure 7).

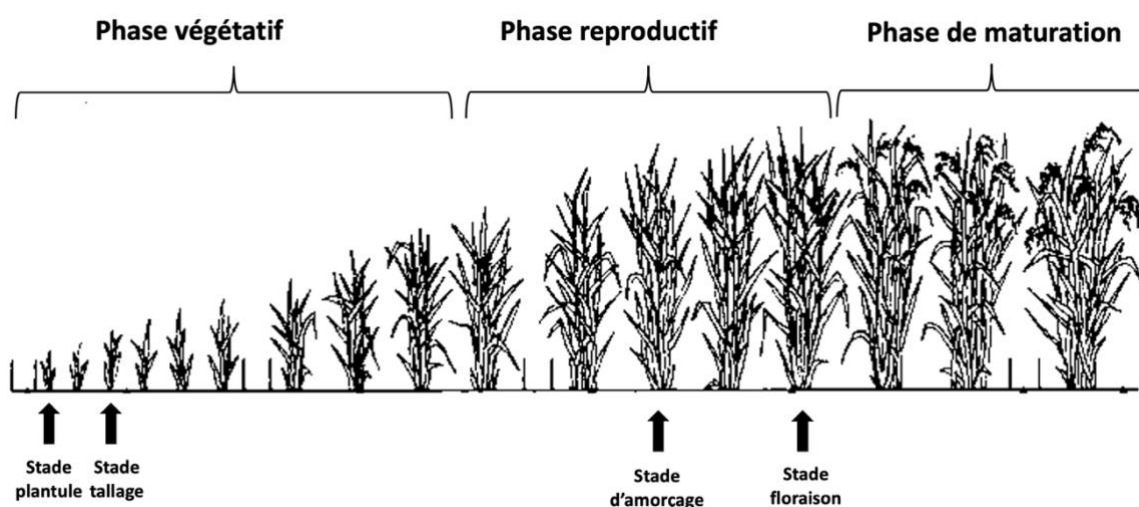


Figure 7 : Illustration visuelle présentant les divers stades de croissance du riz conformément à la classification BBCH, ainsi que la mise en évidence des phases sélectionnées pour les tests au cours de l'expérience. Source : FAO, 2003

Ces stades de développement correspondent aux périodes durant lesquelles la plante de riz montre la plus grande fragilité face aux stress externes (Lacharme, 2001). Ils jouent donc un rôle critique dans la détermination de la qualité et du rendement de la culture. Le stade de la plantule s'étend de l'émergence de la première feuille à l'apparition de la cinquième feuille. Durant ce stade, les racines se forment, jouant un rôle crucial pour le reste de la phase végétative. Elle constitue une période critique pendant laquelle la plante est très sensible aux conditions extérieures défavorables, pouvant entraîner une croissance lente, des jeunes plants affaiblis, des feuilles décolorées, voire la mort des jeunes plants (FAO, 2003, Lacharme, 2001). Le stade de tallage se situe entre l'apparition de la cinquième feuille et celle de la première talle. Il revêt une importance significative dans le développement de la plante (Lacharme, 2001). Les facteurs environnementaux défavorables peuvent entraîner une production de talles médiocre (FAO, 2003). Le stade d'amorçage marque le début de la formation de l'inflorescence du riz,

comprenant les futurs épis porteurs des grains. C'est à ce moment que les panicules commencent à se former. Ce stade joue un rôle essentiel dans la croissance du riz et aura un impact sur la qualité du grain et la floraison (Lacharme, 2001). Ce stade est identifié en examinant le développement interne de la panicule Figure 8B), visuellement, cela peut être repéré par la fine extrémité des feuilles, similaire à un corset (Figure 8 A) (Phan, 2023). Ce stade critique est sensible aux facteurs externes défavorables qui peuvent engendrer une émergence retardée ou irrégulière des panicules, la décoloration des grains, ou des épis argentés peuvent résulter de conditions peu propices (FAO, 2003). Enfin, le stade de floraison débute avec l'émergence de la panicule à partir de la gaine de la feuille et prend fin lorsque la panicule est complètement développée et visible Figure 9 (Lacharme, 2001). Des facteurs extérieurs défavorables peuvent provoquer un retard ou une irrégularité dans la floraison, ainsi qu'une diminution du nombre d'épillets.



Figure 8 : Photographie mettant en évidence le processus de détermination du stade d'amorçage chez les plantes de riz : repérage visuel du stade d'amorçage par l'apparition d'une fine extrémité semblable à un corset sur les feuilles (A) et formation des panicules au sein de la tige (B).



Figure 9 : Photographie mettant en évidence le stade de floraison atteint par la plante de riz.

4.2. Conditions de culture

Des plants de riz ont été exposés à des chutes de téphra au sein d'une serre de 64 m² faisant partie de la Plateforme SEPHY, UClouvain. Les conditions environnementales contrôlées adoptées au cours de l'expérimentation ont permis de reproduire le climat chaud et aride nécessaire à la croissance de cette variété spécifique. L'expérimentation comprenait un total de 396 plantes réparties en 18 répétitions, avec 36 plantes témoins (Figure 10). Chaque bac rectangulaire abritait six plantes de riz, et l'association de trois bacs correspondait à une application de téphra. Cinq niveaux de charge de téphra (0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻²) ont été appliqués aux quatre stades phénologiques distincts. Le terme "test" a été employé pour désigner une charge de téphra appliquée à un stade phénologique spécifique, et ainsi à l'association de trois bacs. La configuration finale de la culture dans la serre est présentée à la figure A-1 à la fin de l'expérimentation.

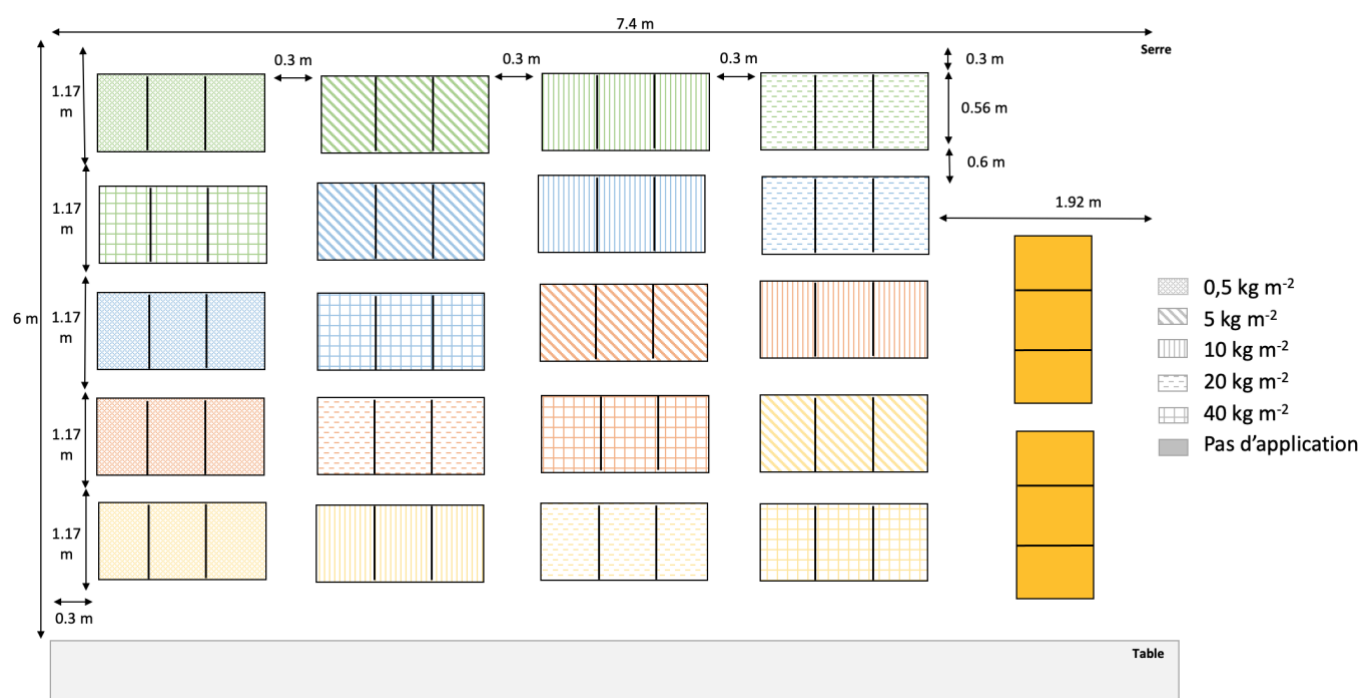


Figure 10 : Illustration de la disposition des tests dans la serre. Les stades de développement sont codés par des couleurs : plantule (vert), tallage (bleu), amorçage (orange foncé), floraison (jaune). Les témoins sont représentés en orange clair.

Pendant la durée de l'expérience, une température moyenne diurne de 26,5 °C et une température nocturne de 24 °C ont été maintenues. L'humidité moyenne était de 61 % pendant le jour et 64 % pendant la nuit. Toutefois, les températures ont occasionnellement atteint des valeurs maximales de 41 °C en été et minimales de 17 °C en hiver. Dans des conditions extrêmes, l'humidité a varié de 15 % à 88 %. Pour compléter l'éclairage naturel, des lampes LED (120 $\mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ont été utilisées lorsque l'irradiance extérieure était inférieure à 350

W m^{-2} , maintenant ainsi une photopériode de 12 heures pendant l'automne et l'hiver (Zingore et al., 2014). L'activation des lampes LED n'a débuté que le 20 décembre 2022. Les données relatives à l'évolution des conditions au sein de la serre pendant l'expérience ont été relevées à intervalles de 10 minutes, de 00:01 à 23h50, chaque jour du 9 novembre 2022 au 11 mai 2023, comme illustrées aux figures A-3, A-4 et A-5.

L'expérience s'est déroulée sur une période allant d'octobre 2022 à mai 2023, couvrant une durée totale de 193 jours, soit approximativement 27 semaines, depuis la phase de germination jusqu'à la récolte. Les graines de riz ont été initiées en germination le 31 octobre dans une salle de germination maintenue à 25°C , cette phase s'étendant sur une période de neuf jours. Dans chaque pot, une dizaine de grains de riz ont été disposés sur un papier filtre, avec une mince pellicule d'eau positionnée au fond du pot, comme illustré dans la Figure 11.



Figure 11 : Photo illustrant le processus de germination, avec dix graines par pot disposées sur un lit d'eau. Cette photo montre la mise en place expérimentale où les conditions optimales ont été créées pour encourager la germination des plantules de riz.

Le repiquage des plantules a été réalisé le 9 novembre. Pour ce faire, un substrat a été préparé en amont en respectant la proportion de 2/3 de terre et 1/3 de sable de rivière. La fertilisation a débuté le 28 novembre et consistait en un mélange spécifique composé de 0,43% de NH_4NO_3 , 0,17% de KH_2PO_4 , 0,2% de K_2SO_4 et 99,2% d'eau déminéralisée. Ce mélange a été directement appliqué dans les bacs gris pour répondre aux besoins nutritionnels des plantes. Chaque plante a reçu une dose hebdomadaire de 10 ml de fertilisant, totalisant ainsi 60 ml par bac. Un processus de désherbage a été également mis en œuvre hebdomadairement. L'irrigation de la culture a été assurée à l'aide d'eau de pluie, versée directement dans les bacs gris à hauteur de 8 cm d'eau par bac. Les épandages successifs de téphra ont été effectués le 16 novembre, le 19

décembre, le 7 mars et le 20 mars, respectivement pour les stades plantule, tallage, d'amorçage et de floraison (soit sept jours, 40 jours, 106 jours et 119 jours après la transplantation). Afin d'éviter toute contamination croisée, des bâches ont été utilisées lors des opérations d'épandage et après l'application des téphra, des précautions particulières ont été prises pour éviter tout contact ou mouvement des plantes, visant à empêcher la chute de particules depuis les feuilles. Les récoltes ont eu lieu, le 26 avril pour les plantes aux stades de tallage, d'amorçage et de floraison, et le 11 mai pour les plantes témoins ainsi que celles au stade d'initiation. Étant donné que toutes les plantes n'avaient pas évolué et atteint leur maturité simultanément, des dates de récolte variable ont été mises en place. Une fois que 85-90% de la culture a atteint la maturité (Tabuk, 2021), les plantes furent lavées avec de l'eau de pluie pour éliminer les dépôts de téphra présents. Après un délai de 24 heures, on procéda à la récolte. Les plantes ont été coupées au niveau du sol, et ensuite, les panicules ont été séparées des tiges et des feuilles au niveau de la marque blanche (Figure 12). Enfin, les épillets ont été séparés de la panicule.

La bonne croissance et la santé des plantes ont été surveillées tout au long du cycle de culture. Après 14 semaines de croissance, une légère carence en potassium a été observée pour les stades d'amorçage et de floraison (Figure A-6) (Zingore et al., 2014), et après 20 semaines, la présence du champignon *Aspergillus oryzae* (Cohn, 1884) a été notée.



Figure 12 : Photo illustrant le marquage (ligne blanche) délimitant de la panicule du reste de la plante. Cette démarcation permet une séparation précise lors des procédures de récolte et d'analyse.

4.3. Les téphra : utilisation, propriétés et test homogénéité

L'application des téphra sur les plantes a été réalisée à l'aide de deux dispositifs. Le premier est un tamis d'une maille de 4 mm (Figure 13 A), utilisé pour épandre la charge de $0,5 \text{ kg m}^{-2}$. Dans la pratique, ce tamis est placé à une hauteur de 1 m et la quantité précise de téphra est manuellement répartie sur le tamis, qui le laisse passer à travers. Le deuxième dispositif (Figure 13 B) a été utilisé pour simuler des charges au sol de téphra de 5, 10, 20 et 40 kg m^{-2} . Il s'agit d'un épandeur de sel (Western WB-160D) qui a été modifié. Il est équipé d'un bac de dimensions $100 \times 40 \times 60 \text{ cm}$ qui contient les téphra. Cet épandeur est positionné à une hauteur de 1,5 m au-dessus du sol. Lorsque l'épandeur est mis en mouvement, les particules de téphra sont libérées par l'intermédiaire de 20 petites ouvertures situées au fond du bac.



Figure 13 : Photos du tamis d'une maille de 4 mm (A) et de l'épandeur de téphra utilisé pour appliquer le téphra sur la culture de riz (B), avec les bâches rigides aux extrémités. L'épandeur de téphra se compose d'un bac à téphra installé sur épandeur de sel roulant positionné à 1,5m au-dessus du sol.

Les téphra utilisés dans nos expériences ont été obtenus artificiellement par le broyage d'une roche volcanique fraîche (phonolite), extraite à proximité du volcan Laacher See en Allemagne (Van den Bogaard et Schmincke, 1984). Le Tableau 2 indique la composition massique de la phonolite.

Tableau 2 : Composition en bulk de la phonolite utilisée pour produire le substitut de téphra.

Élément majeur	Poids (%)
SiO ₂	52.5
Al ₂ O ₃	21.8
K ₂ O	9.6
Na ₂ O	7.8
Fe ₂ O ₃	2.9
CaO	1.5
TiO ₂	0.3
MgO	0.2

Pour caractériser la distribution granulométrique des téphra, une analyse basée sur la diffusion dynamique de la lumière (Nanotracs flex) a été effectuée en utilisant de l'eau déminéralisée. Quatre échantillons ont été prélevés et soumis à un tamisage pour ne conserver que les particules <2000 µm. En moyenne, environ 8% des particules présentent une taille > 2000 µm dans les échantillons. Les résultats révèlent un diamètre moyen de 80 µm, un écart-type moyen de 74 µm et un diamètre médian moyen de 15 µm pour les particules < 2000 µm (Tableau A-1). La figure A-7 illustre la distribution granulométrique moyenne et cumulative des téphra utilisés.

En amont de l'application des téphra sur les plantes, des tests d'homogénéité ont été effectués pour s'assurer d'une répartition uniforme du dépôt de téphra dans les bacs gris (Tableaux A-2 et A-3; Figures A-8, A-9, A-10, A-11, A-12 et A-13). Le premier test, réalisé au moyen d'un tamis, a révélé une distribution relativement homogène, bien que la quantité de téphra déposée sur les plantes ait été légèrement plus élevée que prévu. Le deuxième test effectué à l'aide de l'épandeur a confirmé une distribution homogène des téphra au sein des bacs gris.

4.4. Récolte et collecte de données

Afin de mettre en évidence l'impact des téphra sur la culture de riz, diverses observations et analyses ont été réalisées. Chaque plante a été étiquetée de manière spécifique (Figure A-2). Dans un premier temps, des observations visuelles et des photographies ont été utilisées pour mettre en évidence l'interaction entre les téphra et le feuillage des plantes, notamment en termes d'interception et de rétention des téphra. Toutefois, une évaluation quantitative précise de

l'accumulation des téphra sur les feuilles n'a pas été entreprise afin de préserver l'intégrité de l'expérience et d'éviter toute perturbation des dépôts à la surface des feuilles.

Ensuite, une analyse morphologique hebdomadaire a permis de suivre l'évolution temporelle de la culture tout au long de son cycle, sa hauteur, son nombre de feuilles et la période de sortie des épillets. La hauteur des plantes a été mesurée après chaque application des téphra, à tous les stades de développement. Ces mesures ont été réalisées à l'aide d'un mètre rigide, depuis la base de la plante jusqu'à la feuille la plus haute. En parallèle, le nombre de panicules a été comptabilisé pour chaque stade, débutant dès que la plante a atteint le stade d'amorçage. En outre, le nombre de feuilles par plante a été récolté, cette évaluation s'est limitée aux plantes des stades de plantule et de tallage. En raison de la densité des feuilles et des dépôts des téphra sur les plantes, la poursuite du comptage des feuilles au-delà de ces stades était irréalisable, car elle aurait entraîné des erreurs de mesure significatives.

L'évaluation de la production de la culture a été effectuée grâce à diverses analyses et calculs post-récolte. Pour ce faire, rappelons que les tiges et les feuilles ont été séparées des panicules, et les épillets ont été extraits des panicules. Parmi les paramètres étudiés, le nombre de panicules sorties et fécondées a été relevé. Cette observation revêt une importance particulière, car elle témoigne de l'achèvement du cycle de reproduction des plantes et de la réussite de la pollinisation par le transfert de pollen au pistil. Les panicules non fécondées, caractérisées par des épillets vides, indiquent que la phase de reproduction est toujours en cours et que la pollinisation n'a pas eu lieu ou n'est pas complète (Escale et al., 2015). De plus, le poids des épillets par bac a été relevé à l'aide d'une balance de précision 0,01g puis le nombre d'épillets par test a été minutieusement compté à l'aide d'un compteur de semences à la ferme de Marbaix (Figure A-14). À cela s'ajoute le dénombrement des épillets fertiles et vides pour six panicules par test, en sélectionnant deux petites, deux moyennes et deux grandes panicules. La séparation des épillets a été réalisée par observation visuelle Figure 14, ce qui a permis de calculer le taux d'épillets fertiles selon la formule [2].

$$\text{Taux d'épillets fertile} = \frac{\text{Nombre d'épillets total} - \text{Nombre d'épillets vide}}{\text{Nombre d'épillets total}} \quad [2]$$



Figure 14 : Photographie illustrant la procédure de classification des épillets fertiles et vides. Cette image montre le processus de tri minutieux où les épillets sont examinés visuellement et classés en deux catégories distinctes : les épillets fertiles et les épillets vides.

Finalement, il y a la collecte des poids secs et humides de toute la plante à l'exception des épillets. Ces mesures permettent le calcul du taux d'humidité des tiges et des feuilles à l'aide de la formule [3] (Dembélé, 2014).

$$\text{Humidité (\%)} = \frac{\text{Poids humide} - \text{Poids sec}}{\text{Poids humide}} \times 100 \quad [3]$$

Les échantillons sont placés au réfrigérateur à une température de 5°C pendant une nuit après leur récolte. Le jour suivant, le poids en condition humide des épillets est mesuré à l'aide d'une balance d'une précision de 0,01g. Par la suite, les échantillons sont introduits dans une étuve à une température de 105°C pendant une période de 24 heures (Boroze et al., 2021) et le poids en condition sèche est relevé. Seul le poids sec des épillets sera relevé.

Enfin, après avoir observé l'évolution de la culture et analysé la production, une hypothèse a émergé, suggérant la possibilité d'une fertilisation des plants de riz liée à l'apport artificiel de téphra. Par conséquent, nous avons procédé à l'analyse des teneurs en potassium, calcium et silicium présent dans les racines, les feuilles, les tiges et les épillets des plantes. Cela visant à confirmer cette hypothèse. Ces trois éléments minéraux sont essentiels pour une bonne croissance et un bon développement de la plante et ils sont également présents dans les téphra (Lerot, 2006). La composition des plantes a été analysée par spectroscopie d'émission atomique (ICP-OES). Les analyses ont été réalisées pour quatre racines, quatre plantes et trois échantillons d'épillets, couvrant trois niveaux de charge de téphra (0,5, 10, 40 kg m⁻²) et deux stades phénologiques distincts (stade plantule et stade de floraison), en plus des échantillons

témoins. Les échantillons ont été broyés pour obtenir une granulométrie de 200 μm , puis séchés à une température de 105 °C pendant 12 heures avant que d'être calcinés à 500 °C pendant 12 heures. La composition des résidus de la calcination a été mesurée par ICP-OES après fusion alcaline à 1000 °C en présence de métaborate/tétraborate de lithium. La limite de détection des éléments chimiques analysés est comprise entre 0,001 et 0,1 ppm (mg/L). La justesse et la précision des mesures sont respectivement inférieures à 10% et 2%.

4.5. Traitement de données

Avant l'application des téphra, les plantes mortes prématurément (Figure A-14) et celles qui n'ont pas su se développer correctement (Figure A-15) ont été exclues des bases de données (comme indiqué dans la Figure 15). Pour les plantes du stade plantule, deux plantes ont été retirées pour une charge de 0,5 kg m^{-2} , sept plantes ont été retirées pour une charge de 5 kg m^{-2} , cinq pour une charge de 10 kg m^{-2} , trois pour une charge de 20 kg m^{-2} , et une pour une charge de 40 kg m^{-2} . Pour les plantes au stade de tallage, trois ont été retirées pour une charge de 5 kg m^{-2} . Au stade d'amorçage, une plante a été retirée pour une charge de 10 kg m^{-2} , et enfin, au stade de floraison, une plante a été retirée pour une charge de 10 kg m^{-2} (Figure 15).

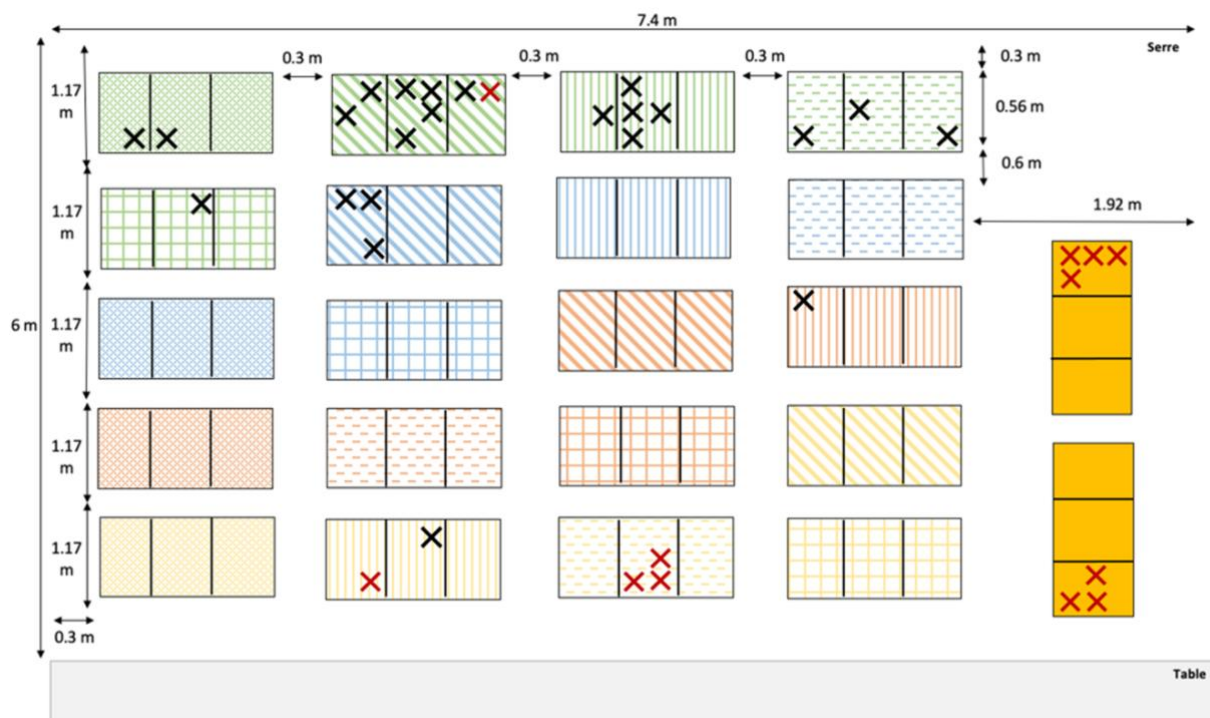


Figure 15 : Diagramme illustrant la sélection des plantes exclues des bases de données. Les plantes mortes prématurément sont indiquées par une croix noire, tandis que les plantes qui n'ont pas réussi à se développer correctement sont marquées d'une croix rouge.

L'évaluation de l'impact des téphra sur la croissance des cultures a requis le calcul des moyennes pour chaque test afin de mettre en avant les tendances observées. Parallèlement, l'écart-type a été calculé pour évaluer les variations au sein de chaque test. Pour évaluer la production post récolte et l'impact des téphra sur la fertilité des plantes, les données brutes ont été représentées sous forme de « boîtes à moustache » (boxplots). Ces diagrammes présentent la distribution et la dispersion des données, mettant ainsi en évidence les mesures de tendance centrale, les valeurs aberrantes et la variabilité des données. Par ailleurs, pour évaluer statistiquement les différences entre les données des groupes témoins et celles des divers essais, des tests de Dunnett ont été appliqués. Le test de Dunnett compare plusieurs groupes expérimentaux à un groupe de contrôle, en identifiant les différences significatives dans les moyennes. Les résultats sont visuellement présentés à l'aide d'astérisques. Un astérisque peut indiquer qu'une différence entre le groupe et le groupe de contrôle est significative à un niveau de 5 %. Deux astérisques signalent une signification à un niveau de confiance de 1 %. Enfin, trois astérisques reflètent une signification encore plus rigoureuse de 0,1 % (PyPI, 2022). Toutes les données brutes recueillies sont fournies en annexe pour référence. L'ensemble des calculs et schémas ont été réalisés à l'aide du langage de programmation Python et du logiciel spider.

V. Résultats

5.1. Interception et rétention des téphra sur le feuillage

Visuellement, une charge de téphra identique entraîne une distribution uniforme sur les feuilles de riz, quel que soit le stade de croissance de la plante. La relation entre la quantité de téphra présente sur les feuilles et la charge de téphra appliquée est directement proportionnelle. En effet, l'évaluation visuelle montre que l'augmentation de la charge massique de téphra s'accompagne d'une diminution de la surface foliaire verte, aboutissant à une couche homogène et dense à partir d'une charge $\geq 20 \text{ kg m}^{-2}$. Cette observation est valable pour les quatre stades phénologiques (Figure 16 A, B, C, D). Cependant, avec le développement de celle-ci, la quantité de téphra sur les feuilles ou les épillets augmente en raison d'une surface foliaire plus grande (Figure 16 A, B, C, D). De même, l'accumulation des téphra sur les panicules préexistantes augmente avec la charge (Figure 16 D). À partir du stade de tallage, les feuilles et les épillets des plantes fléchissent légèrement sous le poids des téphra, entraînant une érosion partielle du dépôt. Une charge de 40 kg m^{-2} sur les plants de riz conduit à l'accumulation de téphra sur le sol et l'enfouissement partiel de la tige (les deux premiers centimètres) (Figure A-16). Des charges de 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m^{-2} induisent une déformation du feuillage, sans toutefois entraîner une rupture mécanique. L'adhésion des téphra aux surfaces foliaires dépend de l'orientation de la feuille et de la charge appliquées. Les téphra se déposent principalement sur la face adaxiale des feuilles directement exposée au dépôt. La rétention du téphra est modulée par l'inclinaison des feuilles.

De nouvelles feuilles apparaissent déjà une semaine après l'exposition aux téphra des plantes aux stades plantule et tallage (Tableaux A-5 et A-6). La sénescence des anciennes feuilles se poursuit tout au long du développement de la plante. La croissance normale des plantes aux stades plantule et tallage exposées au téphra s'accompagne d'une disparition progressive du dépôt; celui n'est plus visible après cinq semaines de culture (Figure 17 A et B). À la fin du cycle de culture, seules les plantes qui ont été exposées au téphra aux stades d'amorçage et de floraison conservent un dépôt résiduel sur les feuilles et panicules. La présence de panicules vertes indique que celles-ci sont apparues après l'application de téphra (Figure 17 C et D).

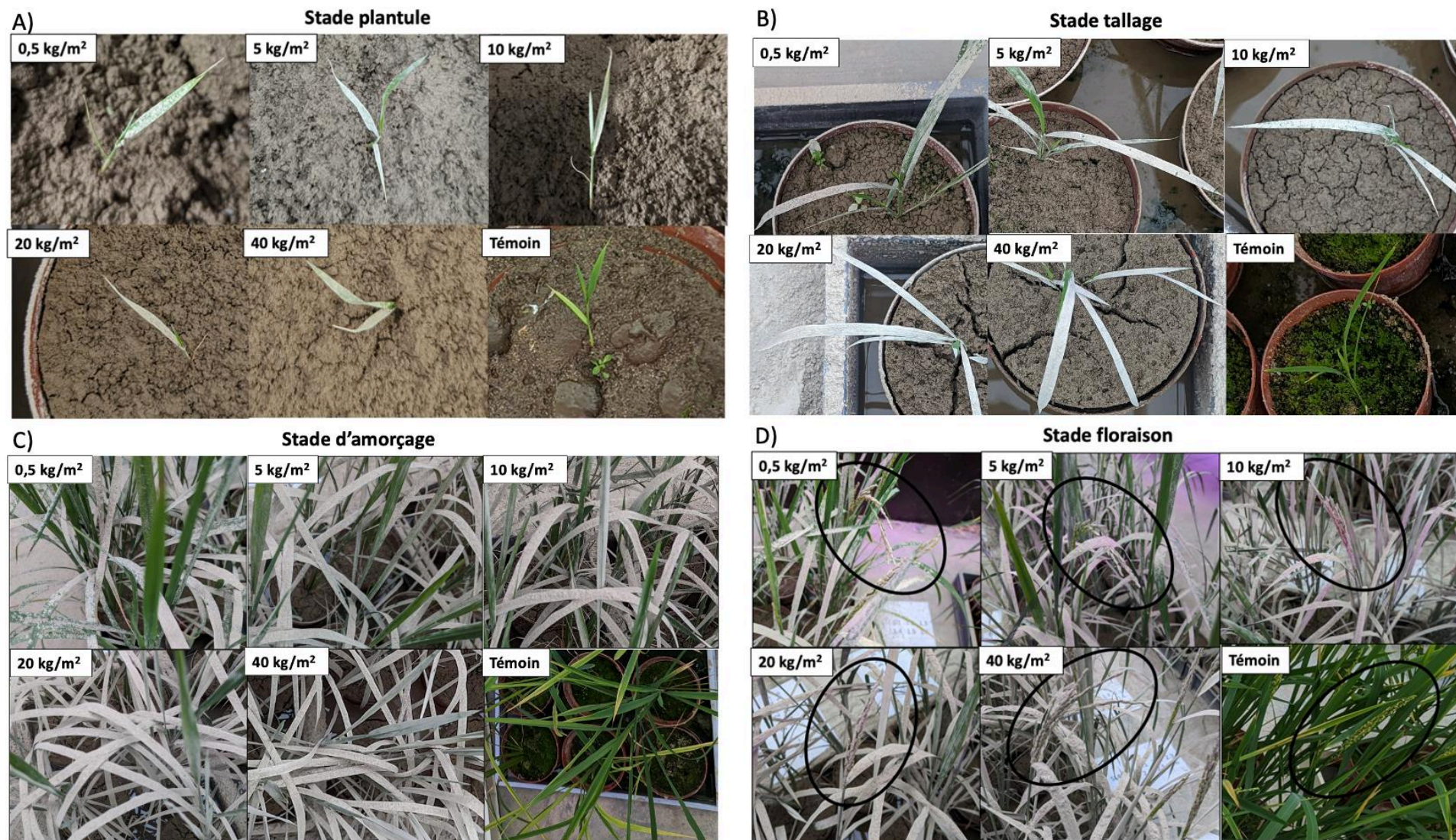


Figure 16 : Plants de riz aux stades plantule (A), tallage (B), amorçage (C) et floraison (D). Photos des plants le jour de l'application de téphra pour les cinq charges testées : 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻² ainsi que du témoin. Pour l'échelle, un pot rouge a un diamètre de 16,4cm.

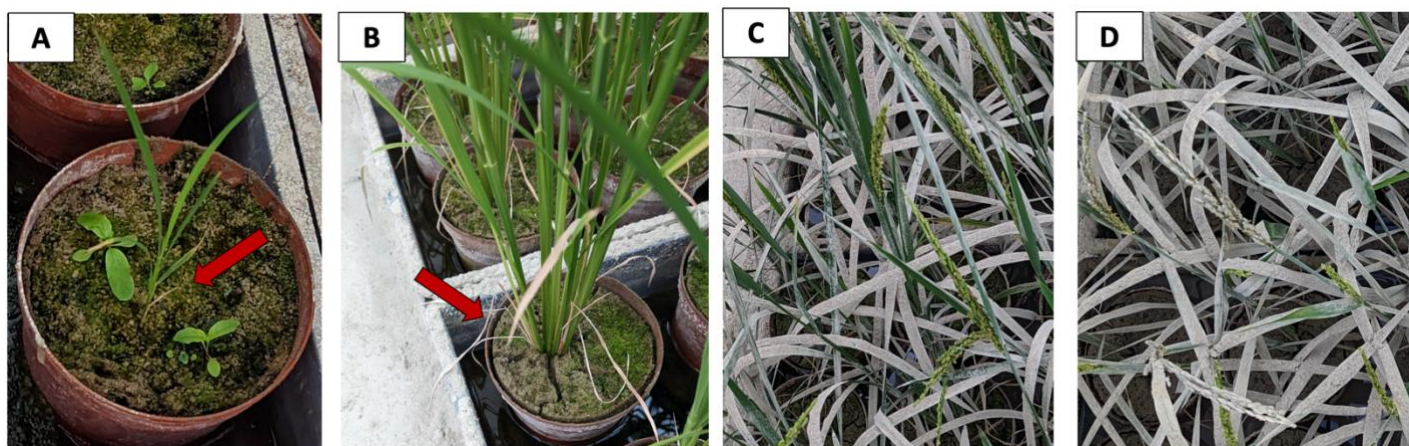


Figure 17: Photos montrant la rétention du téphra (20 kg m^{-2}) sur les feuilles des plantes aux stades plantule (A), tallage (B), amorçage (C) et floraison (D), cinq, 11 et 27 semaines après l'application du téphra. Des observations identiques sont faites pour les autres charges de téphra. Pour l'échelle, un pot rouge a un diamètre de 16,4cm.

5.2. Impact des téphra sur la croissance végétative

5.2.1. Évolution de la hauteur des plantes au cours de la culture

La hauteur des plants de riz augmente progressivement jusqu'au stade d'amorçage, atteint 18 semaines après le repiquage, où elle atteint un plateau (Figure 18). Tout au long de la croissance des plantes, on observe que les plantes témoins sont systématiquement plus élevées que celles ayant été exposées au téphra aux stades plantule et tallage, indépendamment de la charge de téphra. Cependant, cette différence de hauteur entre les plants témoins et les plants traités s'atténue dès qu'elles atteignent le stade d'amorçage (Figure 18). Les plantes traitées ont même tendance à devenir plus grandes que les plantes témoins à partir de ce stade. En analysant la hauteur des plants en fin de croissance, on constate que la hauteur moyenne des plants témoins est de $86,8 \pm 5,8 \text{ cm}$, inférieurs à celle de l'ensemble des plantes testées aux quatre stades phénologiques et pour les cinq charges de téphra appliquées, à l'exception de trois cas : $85,9 \pm 7,4 \text{ cm}$, $85,9 \pm 4,4 \text{ cm}$ et $82,0 \pm 9,3 \text{ cm}$ pour les plantes testées au stade de floraison avec une charge de 20 kg m^{-2} , ainsi que celles testées aux stades tallage et de floraison avec une charge de 40 kg m^{-2} , respectivement (Tableaux A-4, A-6, A-7 et A8).

Ensuite au niveau de l'influence de la charge de téphra appliqué sur la hauteur des plantes, des tendances peuvent être mises en avant, mais des analyses plus approfondies sont essentielles pour tirer de réel conclusion à ce sujet. En regardant les graphiques (Figure 18), avant que les plantes n'aient atteint le plateau, il semblerait qu'au stade plantule une charge plus élevée de téphra entraîner une hauteur de plante accrue, tandis qu'au stade tallage, une charge plus

importante est associée à une hauteur de plante réduite. Et à partir du stade d'amorçage, la charge de téphra appliquée n'a plus d'influence sur la hauteur des plantes.

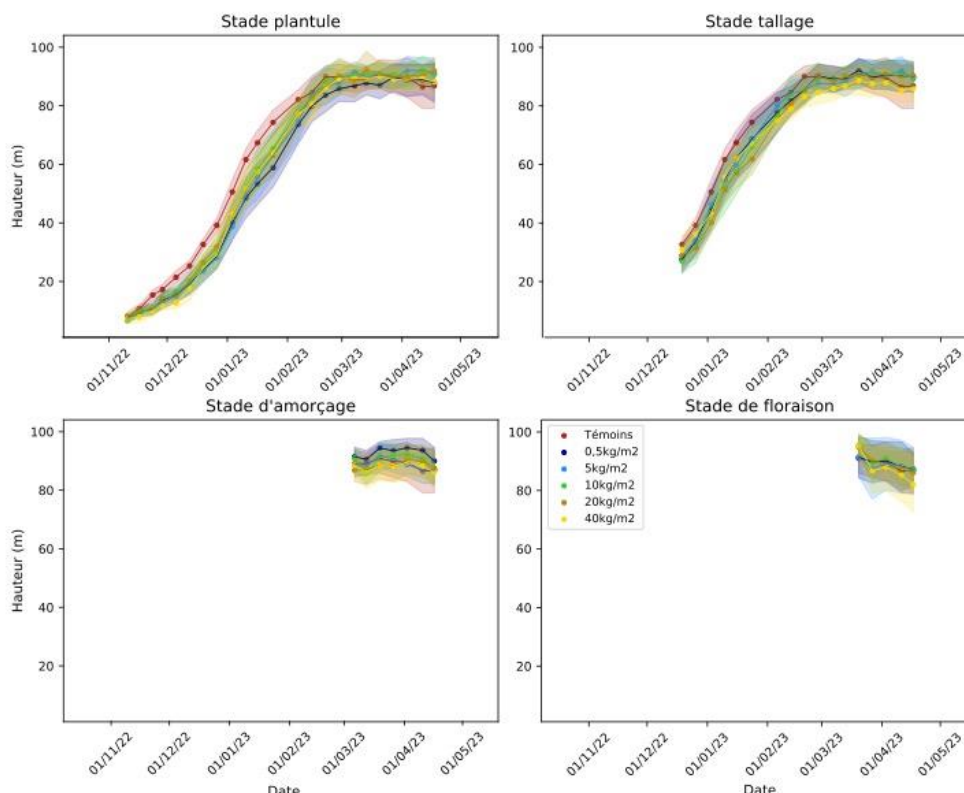


Figure 18 : Évolution de la hauteur des plantes exposées à 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m^{-2} de téphra aux stades plantule, tallage, amorçage et floraison, et comparaison avec le témoin. Chacun des points représente la moyenne des valeurs obtenues pour chaque test. Les moyennes sont calculées à partir des données de 18 plantes à l'exception de certains tests où des plantes ont été exclues (cfr 4.5). Les zones plus transparentes indiquent les écarts-types respectifs.

5.2.2. Évolution du nombre de feuilles au cours de la culture

Pour les plantes aux stades plantule et tallage, le nombre de feuilles augmente de manière quasi monotone au cours du temps (Figure 19). Au début de la croissance, les plantes témoins présentent un nombre de feuilles supérieur à celui des plantes traité au stade plantule, mais cette tendance s'inverse avec le temps. De plus, un épandage plus tardif, au stade tallage par exemple, engendre un nombre de feuilles plus important que les plantes témoins (Figure 19). À la fin de l'expérience, après 27 semaines, on note que les plantes témoins affichent en moyenne $24 \pm 6,7$ feuilles, tandis que les plantes aux stades plantule et tallage, quelle que soit la charge de téphra appliquée, présentent un nombre moyen de feuilles supérieur, atteignant au maximum 31 feuilles (Tableaux A-9, A-10, A-11 et A-12). Cette tendance est particulièrement prononcée pour le stade tallage exposé à 5 kg m^{-2} de téphra.

En ce qui concerne l'effet de la charge de téphra sur le nombre de feuilles, les tendances observées suggèrent que l'application d'une charge importante au stade plantule résulte en un

nombre de feuilles inférieur par rapport à une charge faible. Tandis que l'application d'une charge importante de téphra au stade tallage induit un nombre de feuilles supérieur comparé à une charge moindre (Figure 19). Ces observations ne constituent que des tendances préliminaires, nécessitant une investigation plus approfondie pour parvenir à des conclusions définitives, tout comme cela a été mentionné dans l'analyse de la hauteur des plantes.

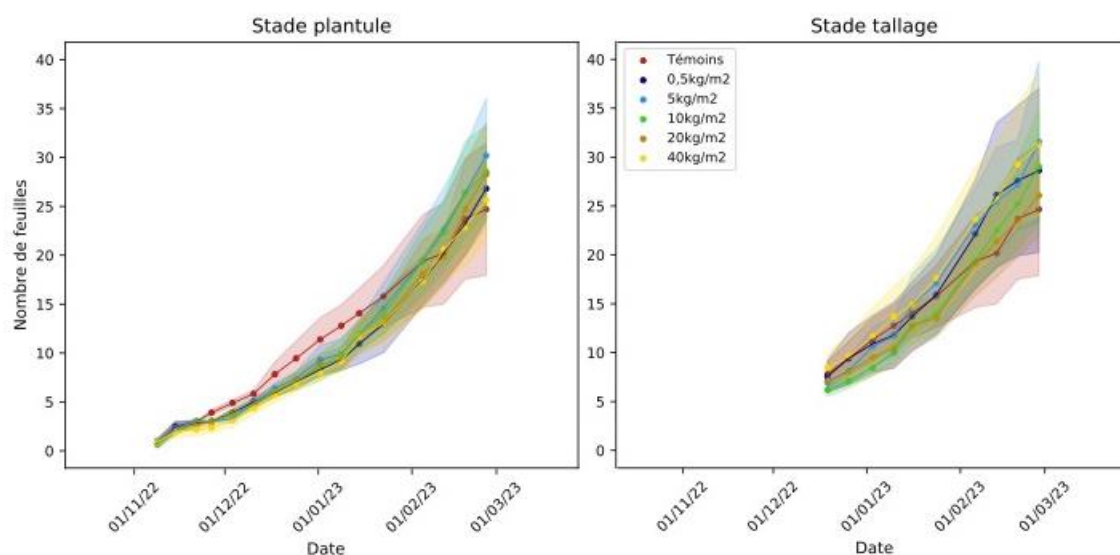


Figure 19 : Évolution du nombre de feuilles des plantes exposées à 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m^{-2} de téphra aux stades plantule et tallage, et comparaison avec le témoin. Chacun des points représente la moyenne des valeurs obtenues dans chaque test. Les moyennes sont calculées à partir des données de 18 plantes à l'exception de certains tests où des plantes ont été exclues (cfr 4.5). Les zones plus transparentes indiquent les écarts-types respectifs.

5.2.3. Évolution de la sortie des panicules au cours de la culture

L'évolution du nombre de panicules varie considérablement selon les quatre stades phénologiques étudiés (Figure 20). Les plantes témoins ainsi que celles traitées au stade de floraison ont toutes montré leurs premières panicules le 16 mars. En revanche, les plantes traitées au stade de plantule et de tallage ont montré un développement plus tardif de leurs panicules, qui sont apparues seulement à partir du 20 mars (Tableaux A-13, A-14, A-15 et A-17). Quant aux plantes traitées au stade d'amorçage, elles ont montré une émergence plus précoce de leurs panicules, dès le 13 mars. Cela s'est produit peu de temps après l'épandage au stade d'amorçage le 7 mars (Figure 20 et Tableau A-16). Avant l'épandage des téphra sur les plantes au stade d'amorçage, celles-ci ne présentaient pas d'épillets. Cependant, une semaine après l'épandage, le 13 mars, une moyenne de $0,11 \pm 0,47$, $0,72 \pm 1,23$, $0,06 \pm 0,24$, $1,28 \pm 1,18$, $1,61 \pm 1,33$ épillets est apparu pour les plantes ayant reçu respectivement 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m^{-2} de téphra (Tableau A-16). Cette sortie accélérée n'a pas été observée pour les trois autres stades et il n'y a pas de corrélation entre la charge appliquée et le nombre de panicules.

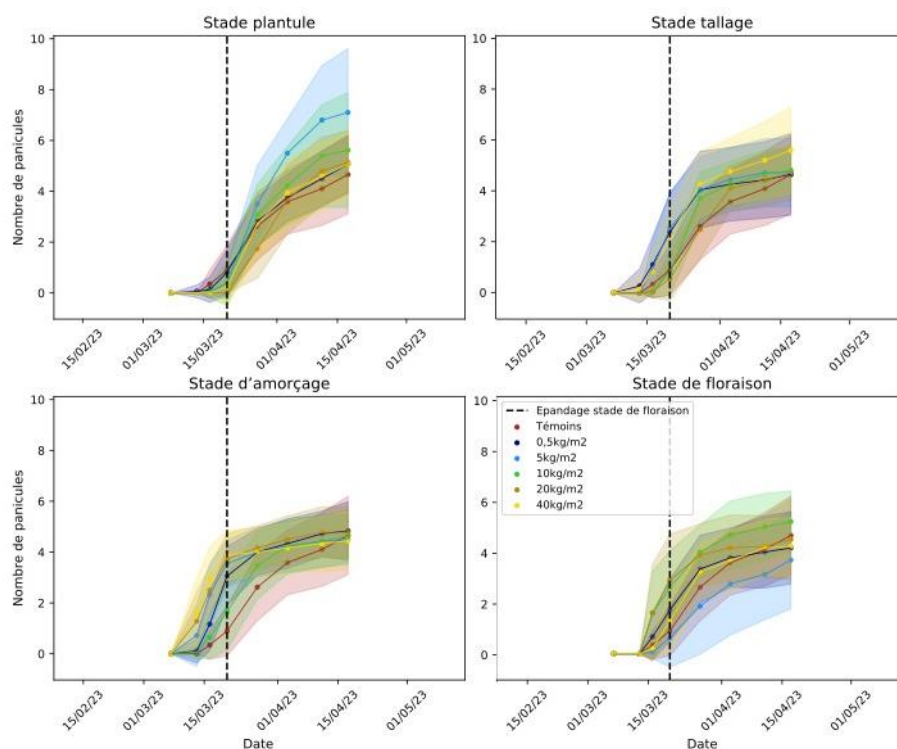


Figure 20 : Évolution du nombre de panicules des plantes exposées à 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m^{-2} de téphra aux stades plantule, tallage, amorçage et floraison, et comparaison avec le témoin. Chacun des points représente la moyenne des valeurs obtenues dans chaque test. Les moyennes sont calculées à partir des données de 18 plantes à l'exception de certains tests où des plantes ont été exclues (cfr 4.5). Les zones plus transparentes indiquent les écarts-types respectifs. La ligne verticale noire indique le début du stade d'amorçage.

5.3. Impact des téphra sur la production

5.3.1. Fertilisation

5.3.1.1. Nombre de panicules et pourcentage de panicules fécondés

Les nombres totaux de panicules dans les différents groupes de traitement ont été comparés à ceux du groupe témoin, révélant des résultats statistiquement significatifs (test de Dunett, $p < 0,05$) (Figure 21 A). Le nombre moyen de panicules des plantes témoins à la récolte était de $8,9 \pm 3,4$ panicules (Tableau A-18). Les plantes exposées à 0,5 et 5 kg m^{-2} de téphra au stade plantule ont montré une augmentation du nombre de panicules de respectivement $26,8 \pm 57,9$ et $53,9 \pm 64,3$ % (Tableaux A-19 et A-23), mais cet effet n'est pas observé pour des charges de téphra plus élevées (Tableaux A-18, A-19 et A-21). Par contre, pour les stades de tallage, d'amorçage et de floraison, une diminution significative (~ 35 – 53 %) du nombre de panicules est mesurée systématiquement après exposition au téphra, quelle que soit la charge de téphra appliquée (Tableaux A-20, A-21, A-22 et A-23).

Le pourcentage moyen de panicules fécondées dans les témoins lors de la récolte était de $61,3 \pm 17,4$ % (Tableau A-18). Les plantes traitées avec du téphra au stade plantule ne diffèrent pas

significativement du groupe témoin (Tableaux A-19 et A-24). En revanche, les plantes exposées au téphra aux stades tallage, amorçage et floraison présentent un pourcentage de panicules fécondées significativement différent (test de Dunett, $p < 0,05$) comparé aux témoins (Figure 21 B). Au stade de tallage, l'augmentation de panicules fécondées varie entre $39,1 \pm 57,5$ et $56,5 \pm 52,4$ % selon la charge de téphra considérée (Tableaux A-20 et A-22). On observe des tendances similaires aux stades d'amorçage et de floraison, avec des augmentations comprises respectivement entre $44,3 \pm 73,4$ et $59,9 \pm 49,2$ % ; et $30,6 \pm 66,9$ et $63,2 \pm 47,6$ % (Tableaux A-21, A-22 et A-24).

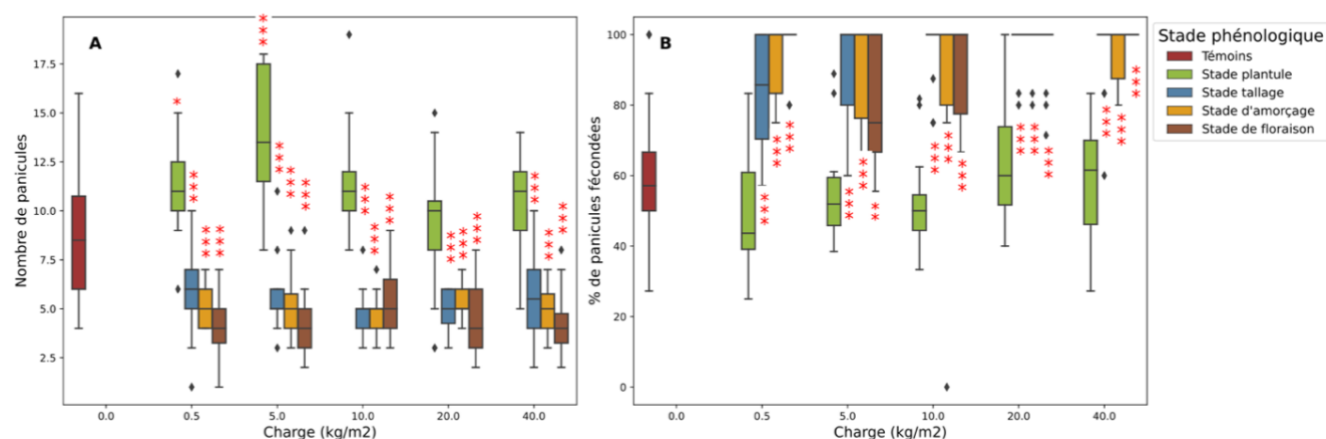


Figure 21: Box plots de la production du nombre de panicules (A) et du pourcentage de panicules fécondées (B) comme mesurés après la récolte des plantes de riz exposées à 0,5, 5, 10, 20, 40 kg m⁻² de téphra aux stades plantule, tallage, amorçage et floraison, et comparaison avec le témoin. Les valeurs p du test de Dunnett pour un niveau de confiance de 95 % sont : (***) 0 < p-value < 0,001, (**) 0,001 < p-value < 0,01, (*) 0,01 < p-value < 0,05. Les losanges représentent les outliers.

5.3.1.2. Nombre et taux d'épillets fertiles

Les nombres et les taux d'épillets fertiles dans les différents groupes de traitement ont été comparés avec leur groupe témoin, révélant des résultats statistiquement significatifs (test de Dunett, $p < 0,05$) (Tableau A-26). Le nombre moyen d'épillets chez les plantes témoins lors de la récolte était de $719,5 \pm 325,8$ épillets (Tableau A-25). En comparaison avec les témoins, les plantes ayant reçu 20 et 40 kg m⁻² de téphra au stade plantule ont enregistré une augmentation du nombre d'épillets de respectivement $72,4 \pm 141,8$ et $61,7 \pm 145,3$ % (Tableaux A-25 et A-26). Cependant, cet effet n'a pas été observé pour les autres charges de téphra (Figure 22 A, Tableaux A-25 et A-26). Le taux moyen d'épillets fertiles chez les témoins était de $84,7 \pm 6,1$ % (Tableau A-27). Une diminution significative de $19,1 \pm 137,4$ % a été observée pour une charge de 0,5 kg m⁻² de téphra appliqué au stade plantule (Tableaux A-28 et A-32). Cependant, les autres traitements n'ont pas montré de différence significative par rapport au groupe témoin (Figure 22 B, Tableaux A-29, A-30, A-31 et A-32).

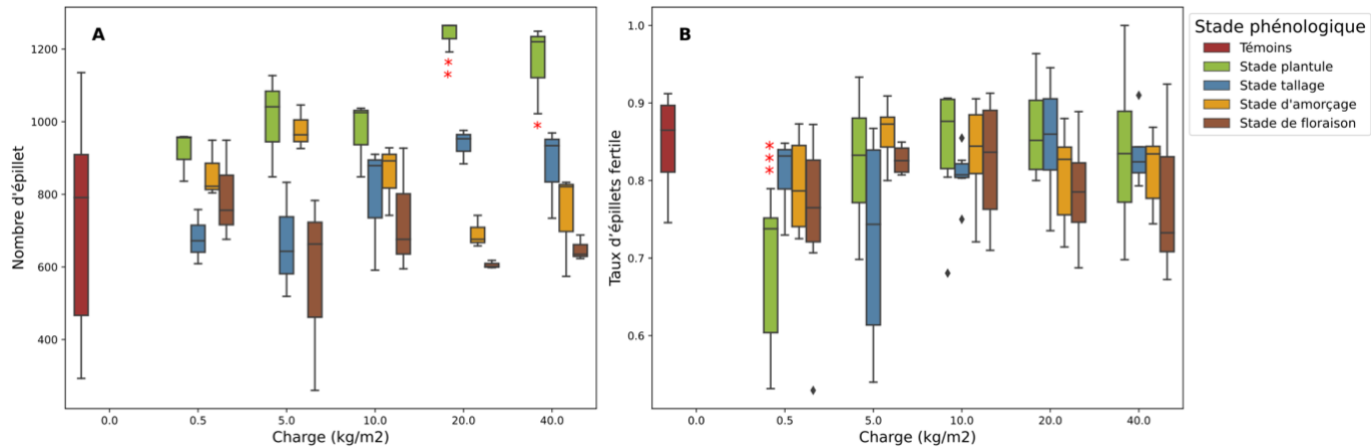


Figure 22 : Box plots de la production du nombre d'épillets (A) et du taux d'épillets fertile (B) comme mesurés après la récolte des plantes de riz exposés à 0,5, 5, 10, 20, 40 kg m⁻² de téphra aux stades plantule, tallage, amorçage et floraison, et comparaison avec le témoin. Les valeurs p du test de Dunnett pour un niveau de confiance de 95 % sont : (***) 0<p-value<0,001, (**) 0,001<p-value<0,01, (*) 0,01<p-value<0,05. Les losanges représentent les outliers.

5.3.2. Biomasse

5.3.2.1. Poids des épillets

La comparaison du poids sec des épillets entre les différents traitements et le groupe témoin a révélé des résultats significatifs (test de Dunnett, $p < 0,05$) (Figure 23). Le poids moyen des épillets chez les plantes témoins s'élevait à $5,47 \pm 2,4$ g (Tableau A-33). En comparaison avec les témoins, les plantes ayant reçu une charge de 5 kg m⁻² de téphra au stade plantule ont enregistré une augmentation significative du poids sec de $86,3 \pm 93,27$ % (Tableaux A-34 et A-38). Cependant, cet effet n'a pas été observé pour les autres charges de téphra appliquées aux différents stades phénologiques (Figure 23, Tableaux A-35, A-36, A-37 et A-38).

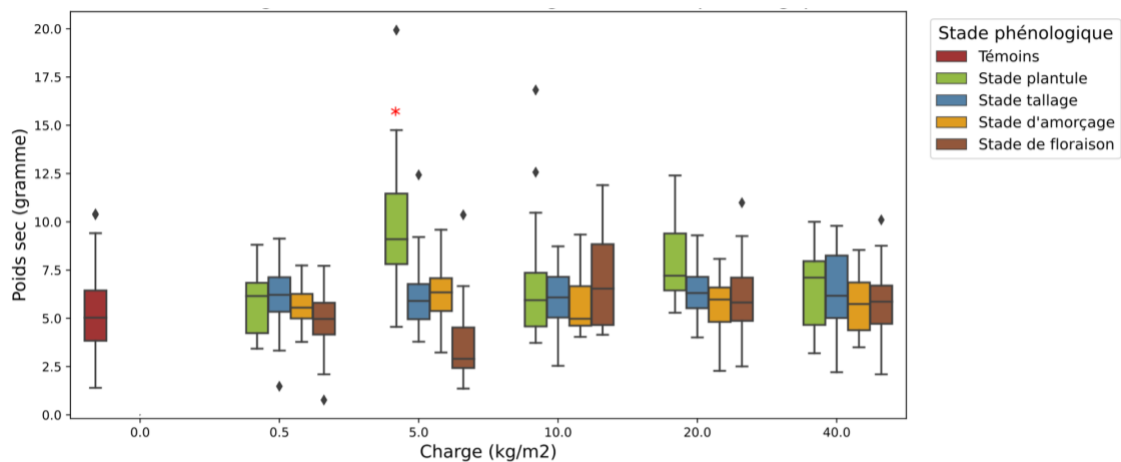


Figure 23 : Box plots du poids sec des épillets (g) comme mesurés après la récolte des plantes de riz exposés à 0,5, 5, 10, 20, 40 kg m⁻² de téphra aux stades plantule, tallage, amorçage et floraison, et comparaison avec le témoin. Les valeurs p du test de Dunnett pour un niveau de confiance de 95 % sont : (***) 0<p-value<0,001, (**) 0,001<p-value<0,01, (*) 0,01<p-value<0,05. Les losanges représentent les outliers.

5.3.2.2. Poids de la paille (feuilles et tiges)

Les poids frais et sec de la biomasse végétale (tiges et feuilles) sont fortement corrélés ($R^2 = 0,98, 0,97, 0,98, 0,75$ respectivement pour les témoins et les stades plantule, tallage et floraison). Par conséquent, seuls les résultats en poids frais sont présentés. Le poids frais des plantes des différents traitements ont été comparé avec le groupe témoin et a donné des résultats significatifs (test de Dunnett, $p < 0,05$) (Figure 24). Le poids frais moyen des plantes témoins était de $45,4 \pm 15,2$ g (Tableau A-39). Par rapport aux témoins, le poids frais des plantes ayant reçu une charge de 5 kg m^{-2} de téphra au stade plantule est significativement plus élevé ($46,2 \pm 86,23 \%$; Tableaux A-40 et A-44). Cependant, cet effet n'a pas été observé pour les autres charges de téphra et quel que soit le stade phénologique considéré (Tableaux A-40, A-41, A-42, A-43 et A-44).

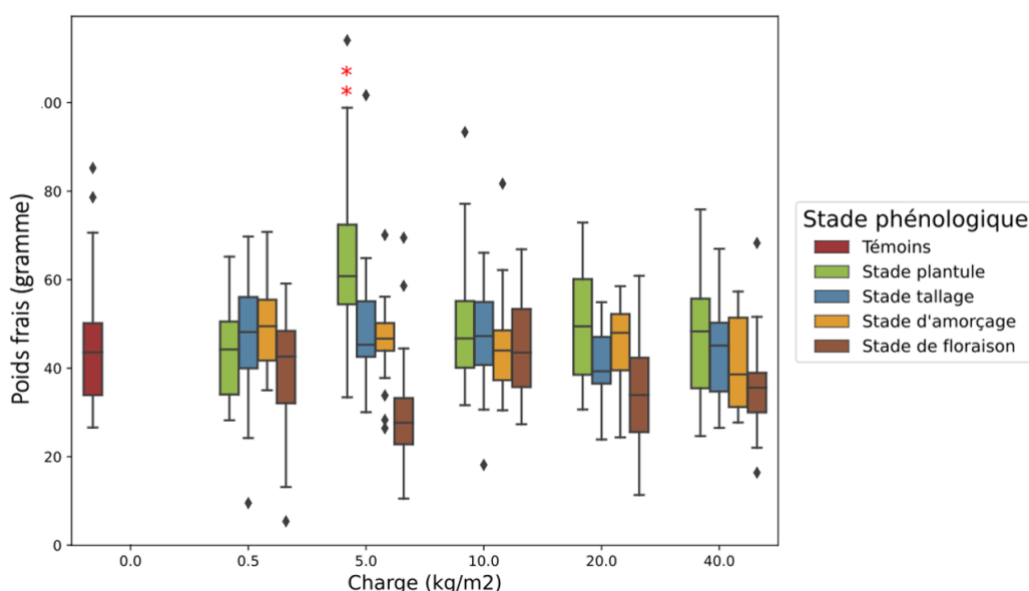


Figure 24 : Box plots du poids frais des plantes comme mesurés après la récolte des plantes de riz exposées à 0,5, 5, 10, 20, 40 kg m^{-2} de téphra aux stades plantule, tallage, amorçage et floraison, et comparaison avec le témoin. Les valeurs p du test de Dunnett pour un niveau de confiance de 95 % sont : (***) $0 < p\text{-value} < 0,001$, (**) $0,001 < p\text{-value} < 0,01$, (*) $0,01 < p\text{-value} < 0,05$. Les losanges représentent les outliers.

5.4. Teneurs en potassium, calcium et silicium dans les différentes parties de la plante

Les teneurs moyennes en potassium sont les plus faibles dans les épillets ($5457 \pm 517 \text{ mg kg}^{-1}$). Les racines et les feuilles contiennent respectivement environ deux et cinq fois plus de potassium (Tableaux A-46, A-47 et A-48). Comparées au groupe témoin ($9932 \pm 1325,9 \text{ mg kg}^{-1}$), seules les teneurs mesurées dans les racines des plantes exposées à 10 et 40 kg m^{-2} au stade plantule et 40 kg m^{-2} au stade de floraison sont significativement plus élevées (Figure 25 ; Tableaux A-46 et A49).

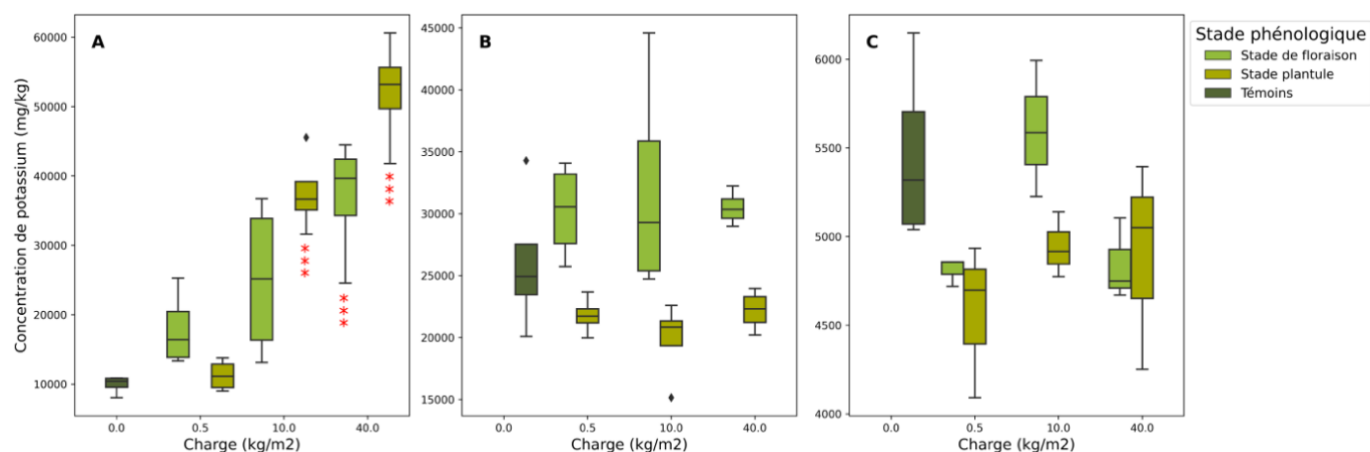


Figure 25 : Box plots des teneurs en potassium dans les racines (A), les tiges et les feuilles (B) et les épillets (C) des plantes de riz exposées à 0,5, 10 et 40 kg m⁻² de téphra aux stades plantule et floraison, et comparaison avec les témoins. Les valeurs *p* du test de Dunnett pour un niveau de confiance de 95 % sont : (***) 0<*p*-value<0,001, (**) 0,001<*p*-value<0,01, (*) 0,01<*p*-value<0,05. Les losanges représentent les outliers.

Les teneurs moyennes en calcium sont les plus faibles dans les épillets (625 ± 116 mg kg⁻¹). Les racines et les feuilles contiennent respectivement environ sept et neuf fois plus de calcium (Tableaux A-46, A-47 et A-48). Comparées au groupe témoin (4368 ± 1519 mg kg⁻¹), les teneurs mesurées dans les racines des plantes exposées à 0,5 et 10 kg m⁻² au stade plantule et 0,5, 10 et 40 kg m⁻² au stade de floraison sont significativement plus élevées (Figure 26 ; Tableaux A-46 et A-50). Et comparées au groupe témoin (625 ± 116 mg kg⁻¹), les teneurs mesurées dans les épillets des plantes exposées à 40 kg m⁻² au stade plantule sont significativement plus faibles (Figure 26 ; Tableaux A-48 et A-50).

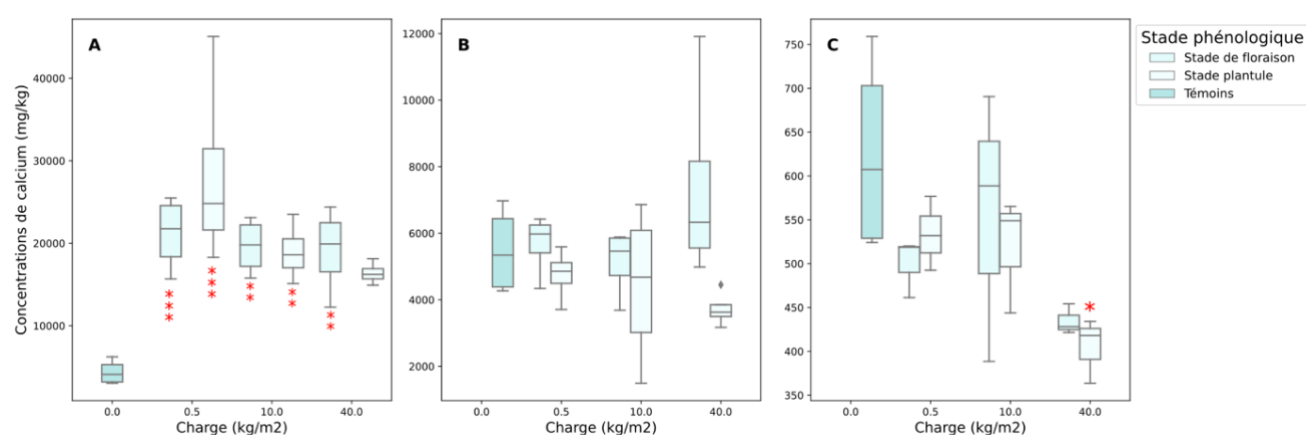


Figure 26 : Box plots des teneurs en calcium dans les racines (A), les tiges et les feuilles (B) et les épillets (C) des plantes de riz exposées à 0,5, 10 et 40 kg m⁻² de téphra aux stades plantule et floraison, et comparaison avec les témoins. Les valeurs *p* du test de Dunnett pour un niveau de confiance de 95 % sont : (***) 0<*p*-value<0,001, (**) 0,001<*p*-value<0,01, (*) 0,01<*p*-value<0,05. Les losanges représentent les outliers.

Les teneurs moyennes en silicium sont les plus faibles dans les épillets ($8945 \pm 1827 \text{ mg kg}^{-1}$). Les racines et les feuilles contiennent respectivement environ 42 et deux fois plus de silicium (Tableaux A-46, A-47 et A-48). Comparées au groupe témoin ($377966 \pm 26404 \text{ mg kg}^{-1}$), les teneurs mesurées dans les racines des plantes exposées à 0,5, 10 et 40 kg m^{-2} au stade plantule et 40 kg m^{-2} au stade de floraison sont significativement plus faible (Figure 27 ; Tableaux A-46 et A-51). De plus, comparées au groupe témoin ($15247 \pm 2948 \text{ mg kg}^{-1}$), les teneurs mesurées dans les tiges et les feuilles des plantes exposées à 40 kg m^{-2} au stade plantule et de floraison sont significativement plus élevées (Figure 27 ; Tableaux A-47 et A-51). Et finalement, comparées au groupe témoin ($8945 \pm 1827 \text{ mg kg}^{-1}$), les teneurs mesurées dans les épillets des plantes exposées à 40 kg m^{-2} au stade de floraison sont significativement plus élevées (Figure 27 ; Tableaux A-48 et A-51).

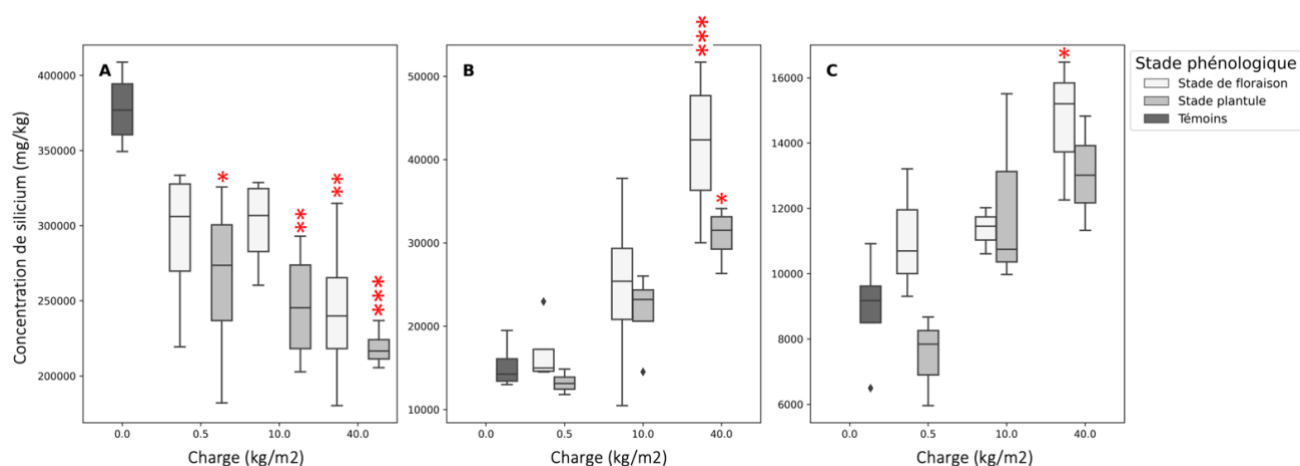


Figure 27 : Box plots des teneurs en silicium dans les racines (A), les tiges et les feuilles (B) et les épillets (C) des plantes de riz exposées à 0,5, 10 et 40 kg m^{-2} de téphra aux stades plantule et floraison, et comparaison avec les témoins. Les valeurs p du test de Dunnett pour un niveau de confiance de 95 % sont : (***) $0 < p\text{-value} < 0,001$, (**) $0,001 < p\text{-value} < 0,01$, (*) $0,01 < p\text{-value} < 0,05$. Les losanges représentent les outliers.

VI. Discussion

6.1. Facteurs influençant l'interception et la rétention des téphra par les plantes de riz

Les observations visuelles suggèrent que la quantité de téphra sur les feuilles est influencée par la charge de téphra déposée artificiellement sur la surface des feuilles de riz, formant une couche homogène à partir de 20 kg m^{-2} (Figure 16). Néanmoins, le stade de développement des plantes semble jouer un rôle crucial dans l'interception et la rétention du téphra sur les feuilles et les panicules du riz ; la quantité de téphra déposée sur les feuilles ou les panicules augmente en raison d'une surface exposée plus importante (Figure 16). L'orientation des feuilles est également un facteur déterminant qui conditionne la rétention du téphra ; le téphra adhère d'autant moins bien à la surface des feuilles lorsque l'inclinaison de celles-ci s'approche de la verticale. Nos résultats corroborent les observations de terrain faites par Ligot et al. (2022).

Nos expériences montrent que l'application de téphra sur le riz, avec des charges de 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m^{-2} , n'entraîne ni ruptures mécaniques, ni dommages irréversibles, mais plutôt une déformation des feuilles, cela à tous les stades phénologiques. Ces résultats diffèrent de nombreuses autres études portant sur diverses cultures telles que le maïs, les pois, de chou et la laitue, où le dépôt de téphra a été associé à des effets tels que l'enfouissement, l'étouffement, ou la chute de feuilles et de fruits, ainsi que le jaunissement, la pourriture et le noircissement, entraînant des conséquences néfastes pour ces cultures (Craig 2015, Cook 1981, Inbar 1994, Ligot et al. 2023, Rees 1979). Le riz exposé aux chutes de téphra se distingue donc des autres cultures en ne subissant que des déformations, indépendamment du stade phénologique. À l'inverse, d'autres cultures présentent généralement des dommages irréversibles lorsqu'elles reçoivent du téphra au stade de floraison (Ligot et al. 2023).

L'exposition du riz au téphra n'a pas généré d'impacts physiques majeurs et la plante a pu se développer normalement. Ceci contraste l'étude de Miller (1967) sur l'impact du téphra sur les haricot, chou, betterave, pomme de terre, maïs et radis qui suggérait une corrélation directe entre la quantité de téphra déposée sur les feuilles des plantes et l'augmentation des dommages. Pour les plantes de riz traitées avant le stade de tallage avec du téphra, le dépôt ne persiste pas en fin de culture en raison de la sénescence des feuilles. Un dépôt résiduel de téphra à la surface des feuilles est visible jusqu'à la fin du cycle de culture lorsque la plante est exposée au téphra après le stade tallage (Figure 17). Nos observations soulignent la résistance du riz face au dépôt de téphra, confirmant un constat fait sur le terrain après l'éruption du volcan Merapi, Indonésie,

en 2006 (Picquout 2015). Dans cette étude, l'auteur notait visuellement l'absence de dommages foliaires significatifs et la préservation de panicules saines chez les plants de riz exposés aux émissions de téphra.

6.2. Influence du dépôt de téphra sur la croissance de la culture de riz

La taille finale des plantes de riz est atteinte au stade d'amorçage. Avant ce stade, l'exposition au téphra engendre une réduction de la hauteur des plantes, mais cet effet tend à être compensé à mesure que la plante se développe. Après le stade d'amorçage, le téphra ne semble plus exercer d'influence sur la hauteur de la plante, indépendamment de la charge de téphra appliqué (Figure 18; Tableaux A-4, A-6, A-7 et A-8). En ce qui concerne le développement des feuilles, des conclusions similaires sont observées. Les plantes exposées au téphra au début de leur croissance produiront généralement moins de feuilles par rapport à celles ayant reçu du téphra plus tardivement (Figure 19 ; Tableaux A-9, A-10, A-11 et A-12). Bien qu'un dépôt de téphra sur le riz entraîne une diminution initiale du nombre de feuilles, il n'affecte pas celui-ci en fin de croissance. Ceci suggère un retard de croissance probablement dû à la présence de téphra à un stade précoce de la croissance. Cette observation est en accord avec les conclusions de Ligot et al. (2023) et Sword-Daniels (2015), indiquant que le retard de croissance pourrait être une conséquence indirecte de la réduction de l'interception de la lumière causée par les feuilles couvertes de téphra, entraînant un déficit de photosynthèse qui altère la croissance des plantes. De manière similaire, Lacharme (2001) et FAO (2003) soulignent que des facteurs externes de stress au début du stade de croissance du riz résultent en une croissance lente et une production de talles médiocre.

L'exposition des plantes de riz au téphra affecte l'émergence des panicules ((Figure 20 ; Tableaux A- 13, A-14, A-15, A-16 et A-17). L'application précoce de téphra aux stades plantule et tallage entraîne un retard dans l'émergence de ces organes. L'application de téphra au stade d'amorçage accélère l'émergence des panicules probablement due à une stimulation de la croissance, pouvant être causée par l'apport d'éléments nutritifs présents dans le téphra. Dans ce contexte, il semble que la présence de téphra puisse améliorer la fertilité du sol en fournissant des nutriments, en particulier le potassium (bien que la présence éventuelle de calcium et de phosphore, non évaluée dans cette étude, ne puisse pas être exclue). Cette amélioration favoriserait le développement des panicules et accélérerait le processus de croissance des plantes. Cette hypothèse sera examinée dans la section 6.3. Les plantes exposées au téphra au stade de floraison ne montrent pas d'impact significatif, probablement en raison du stade avancé

de leur cycle de vie. Ces observations suggèrent que la plante répond différemment à l'exposition aux téphras en fonction de son stade de développement. Néanmoins, un effet confondant lié l'apport par le téphra de nutriments vers le sol ne peut pas être écarté. Ceci pourrait favoriser la croissance des panicules. Ces conclusions vont à l'encontre des travaux de Lacharme (2001) et des spécifications de la FAO (2003) qui suggèrent que des conditions environnementales défavorables, telles que des perturbations environnementales aux stades d'amorçage et de floraison peuvent entraîner une émergence retardée ou irrégulière des panicules du riz.

6.3. Effet fertilisant des téphra sur la culture de riz

En contact avec le sol humidifié, les particules de téphra subissent des réactions de dissolution, entraînant notamment la libération du potassium, du calcium et du silicium (Tableau 2 ; Quant, 1972). Ces éléments peuvent ensuite être absorbés par les racines des plantes et éventuellement être transportés vers les parties aériennes (feuilles, tiges et épillets). Pour évaluer l'impact du téphra sur la fertilité des plantes, des comparaisons ont été effectuées entre les données de l'INRAE de 2021 (Tableau 1) et les teneurs d'éléments présentes dans les grains des témoins de l'expérience (Tableau A-48). Les résultats révèlent des teneurs similaires de potassium et de calcium dans les grains des témoins par rapport aux données de référence de l'INRAE, suggérant un développement normal de la culture. Cependant, l'analyse des épillets des plantes exposées au téphra indique des variations significatives par rapport aux témoins. En particulier, pour les plantes soumises à une charge de 40 kg m^{-2} où la teneur en calcium dans les épillets est inférieure au stade de plantule, tandis que la teneur en silicium est supérieure au stade de floraison par rapport aux témoins (Figure 25, Figure 26 et Figure 27; Tableaux A-48, A-50 et A-51). Les analyses ultérieures des teneurs en potassium, calcium et silicium dans les feuilles et les tiges au moment de la récolte n'ont révélé aucune différence significative avec les témoins, à l'exception d'une teneur significativement plus élevée en silicium pour les plantes ayant reçu 40 kg m^{-2} de téphra aux stades de plantule et de floraison (Tableaux A-47; Figure 25, Figure 26 et Figure 27). Les résultats montrent une plus grande quantité de silicium dans la plante et les épillets, notamment avec une charge de téphra de 40 kg m^{-2} , et une quantité plus faible de calcium. En général, la présence de potassium et de calcium dans les plantes a une influence sur le développement de la plante (SNHF, 2022), tandis que la présence de silicium influence la résistance des plantes aux stress biotiques et abiotiques (Walgraffe, 2018). L'apport de silicium par le biais de l'hydrolyse du téphra pourrait donc influencer la nutrition des plantes et leur résistance aux différentes pressions environnementales (Santos et al., 2020). La teneur plus

élevée en silicium et moins élevée en calcium (par rapport aux plantes témoins) pourrait s'expliquer par la capacité des graminées, comme le riz, à absorber activement le silicium du sol et à l'intégrer dans leurs tissus, entraînant ainsi une possible compétition ou interférence avec l'absorption du calcium (Bloodnick, 2023). La teneur inférieure en calcium dans la plante pourrait éventuellement affecter la croissance initiale des plantes plus faible lors des premiers stades de croissance du riz (cfr 6.2). Ces observations renforcent l'idée que la composition chimique spécifique du téphra peut moduler la disponibilité des nutriments, influencer leur absorption par les plantes et induire des réponses spécifiques de la plante.

Nos observations visuelles, après 14 semaines, suggèrent une carence temporaire en potassium dans les plantes non traitées au téphra, particulièrement aux extrémités des feuilles. Pour les plantes ayant reçu un dépôt de téphra, cette carence semble avoir été temporairement compensée (Figure A-6). Il y aurait donc un effet fertilisant du téphra à court terme. Cependant, des analyses supplémentaires à des intervalles temporels variés devraient être faites afin de valider cette hypothèse. Notamment, des tests réalisés 14 semaines après l'épandage pourraient permettre de clarifier la dynamique temporelle de l'effet fertilisant du téphra au stade plantule.

Finalement, l'analyse comparative des teneurs en potassium, de calcium et de silicium au niveau des racines entre les plantes traitées au téphra et les témoins a révélé des disparités. Des différences significatives ont été observées pour une charge de 10 kg m⁻² au stade plantule et de 40 kg m⁻² au stade de floraison pour les trois éléments testés (Tableau A-46 ; Figure 25, Figure 26 et Figure 27). Ces observations mettent en évidence une absorption sélective par la plante, avec une augmentation du calcium et une diminution du silicium dans les racines, soulignant ainsi la capacité des plantes à réguler l'assimilation de ces éléments en réponse à la présence de téphra.

6.4. Vulnérabilités des plants de riz face au dépôts de téphra

Le dépôt de téphra sur la culture de riz ne semble pas avoir d'effet négatif important sur la production. Les plantes ayant reçu une charge de 5 kg m⁻² au stade plantule ont un nombre plus important de panicules et une biomasse d'épillets et de paille supérieure aux témoins (Figure 23 et Figure 24 ; Tableaux A-34, A-38, A-40 et A-44). Des applications de 20 et 40 kg m⁻² de téphra (toujours au stade plantule) induisent un nombre d'épillets supérieur (Figure 22 ; Tableaux A-25 et A-26). Pour les autres stades phénologiques testés et charges de téphra appliquées, aucune influence significative n'a été observée, que ce soit sur le nombre d'épillets,

leur poids ou leur taux de fertilité (Figure 21, Figure 22, Figure 23 et Figure 24). Une exception peut être faite pour une application de téphra de 0,5 kg m⁻² au stade plantule qui engendre un nombre plus important de panicules mais un nombre d'épillets fertiles inférieur par rapport au témoin. En d'autres termes, bien que davantage de panicules soient produites, une partie n'est pas fécondée (Figures 21 et 22 ; Tableaux A-18, A-19, A23, A28 et A32). Le téphra, toute charge testée confondue, n'aurait donc pas d'impact négatif sur la production. De fait, il pourrait même engendrer un effet positif si le téphra est appliqué au début de la plantation (stade plantule). Cela rejoint d'autres recherches soulignant la résilience des cultures rizicoles en réponse aux dépôts de téphra (Wilson et al., 2007, Lacharme, 2001 et Picquout, 2015). Les résultats de Picquout (2015) vont dans le même sens, indiquant que les plantes de riz sont moins vulnérables à un dépôt de téphra aux stades initiaux de son développement, où sa résistance est plus élevée.

En vue de faciliter la comparaison entre les divers stades phénologiques des cultures en termes de biomasse des épillets et de la paille, ainsi que de différentes charges de téphra appliquées, nous avons calculé une perte de production moyenne (PPM) pour chaque traitement de téphra comme suit :

$$PPM = 100 * \frac{\overline{PB}_{\text{témoin}} - \overline{PB}_{\text{téphra}}}{\overline{PB}_{\text{témoin}}} \quad [4]$$

où $\overline{PB}_{\text{témoin}}$ et $\overline{PB}_{\text{téphra}}$ représentent la biomasse moyenne d'épillet ou de paille des plantes témoins et traitées avec du téphra, respectivement en fonction des utilisations considérées.

Afin d'évaluer le PPM pour chaque stade phénologique et charge de téphra appliquée, en prenant en compte la variabilité, une approche de simulation a été adoptée. Pour ce faire, un échantillon de 1000000 de valeurs a été généré pour $\overline{PB}_{\text{témoin}}$ et $\overline{PB}_{\text{téphra}}$ en supposant une distribution normale. Ces valeurs ont été exploitées en utilisant les moyennes et les écarts types dérivés de nos ensembles de données expérimentales (Tableaux A-53 et A-54). Cette démarche a permis de déterminer un intervalle de confiance pour le PPM moyen. En raison du nombre limité de traitements avec du téphra testés sur chaque type de culture, l'établissement d'un modèle non linéaire robuste pour la relation entre le PPM et la charge de masse de téphra s'est révélé être trop complexe. Par conséquent, nous avons choisi d'adopter une approche linéaire pour extrapoler la valeur moyenne de la production de biomasse entre les différentes charges massiques de téphra examinées au cours de l'expérience.

La Figure 28 illustre les fonctions de fragilité, donnant un aperçu de la relation entre le dépôt de téphra et la perte de productivité des épillets et de la paille correspondante pour chaque stade phénologique de la culture de riz.

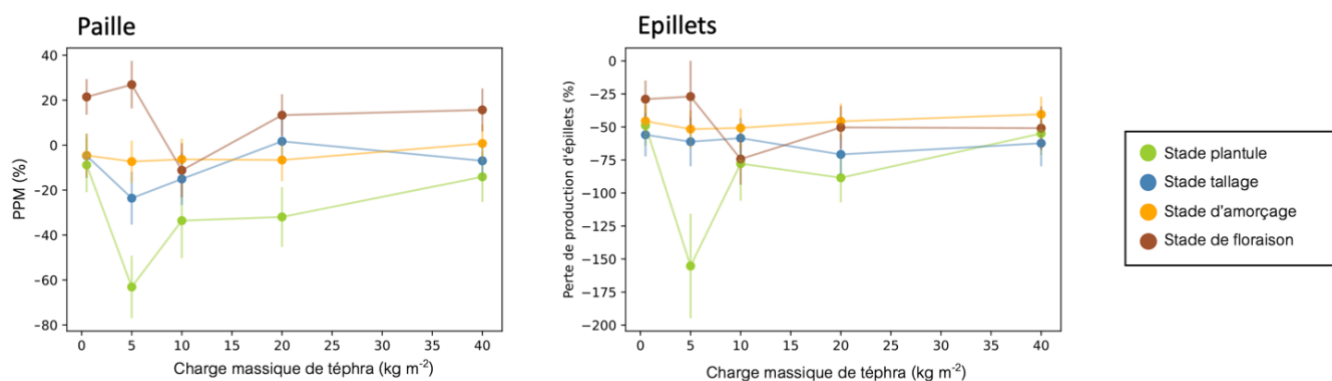


Figure 28 : Fonctions de fragilité illustrant la relation entre la perte de production moyenne (PPM) des épillets et de la paille et la charge massique de téphra appliquée sur les plants de riz aux stades plantule, tallage, d'amorçage et de floraison. La barre d'erreur représente l'intervalle de confiance à 95 %.

L'impact des téphra sur la production agricole présente des variations en fonction des charges massiques de téphra appliquées à la culture et du stade phénologique. Une valeur négative indique une augmentation de la production. En ce qui concerne la perte de production de la paille en fonction de la charge de téphra, on constate que le pourcentage le plus élevé de PPM est atteint chez les plantes au stade de floraison, avec un pic de 37% pour une charge de 5 kg m⁻². La PPM décroît progressivement lorsqu'on considère les plantes ayant reçu du téphra au début de leur développement. Les plantes traitées au téphra au stade d'amorçage présentent un PPM variant de 0,7% à -7,2% pour les cinq charges confondues. Les plantes du stade de tallage affichent un PPM de -4,7%, -23,6%, -15%, 1,7% et -6,9% pour les charges respectives de 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻² de téphra. Enfin, les plantes ayant reçu du téphra au stade plantule présentent le PPM le plus bas, avec une valeur minimale de -63% pour une charge de 5 kg m⁻² de téphra. La même tendance est obtenue pour la PPM des épillets avec une différence au niveau des pourcentages de la perte de production. En effet, pour les épillets, aucune PPM n'est observée. Le téphra aura donc, selon ces résultats, un effet 100% bénéfique sur la production des grains de riz (aucune perte de rendement n'a été observée) peu importe le moment où le téphra atteindra la culture et la quantité qui viendra se déposer. Cet impact est encore plus favorable avec une application de 5 kg m⁻² au stade plantule. Cependant, au niveau de la production de paille, il y aura une perte de production lorsque le téphra atteindra la culture au

stade de floraison. Malgré cela, pour tous les autres stades phénologiques et charges appliquées, l'effet du téphra reste positif sur la production globale de paille.

Nos résultats montrent donc un effet bénéfique du téphra sur la production d'épillets et de paille, avec un effet plus marqué quand le téphra atteint la culture à un stade de développement précoce. Ces résultats contredisent les conclusions de Wilson (2007) qui notent une perte de 50 % du riz mûr dans les zones affectées par 15 kg m⁻² de téphra durant l'éruption du volcan Merapi en 2006. De plus, ces résultats vont à l'encontre de nombreuses études portant sur d'autres cultures, où l'accumulation de téphra est considérée comme un danger critique et a un impact négatif sur le rendement des cultures. C'est notamment ce que Ligot et al. (2023) ont souligné en mettant en avant la perte de rendement influencée par la charge massique appliquée, particulièrement pour des cultures telles que les fourrages, les oignons, les feuilles, les légumineuses, les céréales, les arbres fruitiers et les fruits non arboricoles. Les plantes de riz réagissent donc de manière distincte aux dépôts de téphra par rapport à d'autres cultures.

6.5. Limites et perspectives de l'étude

L'extrapolation de nos résultats expérimentaux à la réalité de terrain doit être faite avec prudence. Tout d'abord, la culture du riz a été mise en place dans des pots avec de l'eau stagnante, soit des conditions de croissance qui diffèrent des conditions naturelles. Une culture en pots, en condition d'eau stagnante, peut potentiellement restreindre le développement des racines et avoir des répercussions sur divers aspects, notamment la disponibilité des éléments nutritifs et la dynamique du téphra dans le sol (Vautherot, 2016, Hagedorn et al., 2018). En effet, dans des pots avec de l'eau stagnante, la diffusion d'oxygène dans le sol peut être limitée. Le manque d'oxygène peut impacter la décomposition de la matière organique et l'activité microbienne, influençant ainsi la disponibilité des éléments nutritifs. Ensuite, dans le milieu contrôlé des serres, les facteurs climatiques tels que la pluie et le vent n'ont pas été reproduits. Ces éléments naturels peuvent influencer la rétention du téphra à la surface des feuilles, sa dispersion dans l'atmosphère, dans le sol et l'eau. En effet, selon Ligot et al. (2023), le vent et la pluie peuvent éroder les téphra déposés à la surface des feuilles des plantes. Ensuite, la dynamique de l'éruption, qui est ici assimilée à une activité volcanique explosive ponctuelle accompagnée d'une seule chute de téphra, n'est pas représentative de toutes les éruptions. Certaines perdurent sur des périodes de temps plus ou moins longues et sont accompagnées d'émissions répétées de téphra.

La littérature scientifique qui documente les impacts des éruptions volcaniques sur l'agriculture révèle que les agriculteurs tentent souvent de minimiser les dégâts sur les cultures en nettoyant rapidement les plantes affectées par un dépôt de téphra. Pour cela, ils les secouent manuellement et/ou les lavent à grandes eaux (Ligot et al., 2023). Cependant, ces techniques nécessitent du temps et des ressources, avec des implications potentielles sur le taux d'humidité des grains. Cela peut entraîner une absorption d'eau par les grains de riz et augmenter leur taux d'humidité. Cette augmentation du taux d'humidité peut compromettre la qualité du riz stocké, favorisant la croissance de moisissures et de champignons, la germination des grains et impactant ainsi sa qualité commerciale. Ces considérations ouvrent des perspectives intéressantes en vue d'informer les agriculteurs sur la pertinence, l'efficacité et les implications de cette méthode.

Finalement, il serait intéressant, dans le prolongement de cette étude, d'explorer les raisons précises pour lesquelles la croissance est ralentie lors d'un dépôt de téphra au stade plantule, mais aboutit ultimement à une production plus importante. Une analyse approfondie serait également bénéfique pour comprendre pourquoi une charge de 5 kg m^{-2} a un impact nettement plus positif, qu'une charge de $0,5 \text{ kg m}^{-2}$ ou 10 kg m^{-2} . Par ailleurs, il serait pertinent d'investiguer la qualité de la production, étant donné que des rendements élevés, mais de moindres qualités pourraient impacter négativement la commercialisation des récoltes. Et il pourrait être intéressant d'élargir l'étude en incluant d'autres variétés de riz afin d'évaluer l'influence de la variété sur les résultats. La variété actuellement sélectionnée présente une stature plus réduite par rapport aux variétés traditionnelles de riz, ce qui la rend moins susceptible de verser. De plus, elle est réputée pour son rendement élevé et sa résistance à certaines maladies, comme rapporter par Kruasuwan et al. (2023). Ces facteurs pourraient influencer la résistance de la plante de riz face à un dépôt de téphra.

VII. Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire était de comprendre et quantifier la vulnérabilité de la culture de riz face aux dépôts de téphra dans des conditions contrôlées, établissant ainsi un lien entre l'intensité des aléas et leurs impacts. Cette recherche a été motivée par le constat du manque de données sur la vulnérabilité spécifique des cultures de riz, la rareté des études entreprises dans ce domaine, et la nécessité de réduire les nombreuses approximations inhérentes aux études actuelles. En effet, les évaluations de risques précises et robustes demeurent indispensables pour informer une gestion efficace des risques de catastrophes et réduire ainsi les probabilités de pertes de rendement dans les cultures. Notre étude a donc contribué à enrichir les connaissances dans ce domaine.

Tout d'abord, elle a établi que la quantité de téphra présente sur les feuilles de riz est influencée par la charge de téphra appliquée, avec la formation d'un dépôt homogène à partir d'une charge de 20 kg m^{-2} . Elle a également mis en évidence l'importance du stade de développement des plantes et de l'orientation des feuilles dans l'interception et la rétention du téphra. Les plantes de riz ont manifesté une résilience aux retombées de téphra, se distinguant par leur capacité à éviter des dommages irréversibles et à maintenir un développement normal, indépendamment du stade de croissance et de la charge de téphra appliquée ($0,5 - 40 \text{ kg m}^{-2}$).

Deuxièmement, cette étude révèle que la réponse de la plante à l'exposition aux téphras varie en fonction de son stade de développement. La croissance du riz est impactée, avec un retard observable jusqu'au stade d'amorçage, après lequel tout dépôt ultérieur ne semble plus influencer la croissance de la plante. Cette tendance s'applique également au développement des panicules, où une exposition précoce au téphra engendre un retard, tandis qu'un dépôt de téphra postérieur au stade d'amorçage n'a plus d'effet. Notamment, des retombées de téphra au stade d'amorçage semblent favoriser l'émergence des panicules.

Troisièmement, cette recherche a mis en évidence un transfert des éléments présents dans le téphra vers différentes parties de la plante. La composition chimique spécifique du téphra et la capacité intrinsèque des graminées à accumuler le silicium semblent engendrer une compétition entre le calcium et le silicium, induisant ainsi des réponses spécifiques de la plante. La quantité d'éléments assimilés semble être influencée par la charge de téphra appliquée, entraînant une accumulation plus prononcée de silicium dans les parties aériennes de la plante avec une charge de téphra plus élevée. De plus, l'effet fertilisant du téphra sur la culture de riz, notamment par

la libération d'éléments tels que le potassium et le calcium, est fortement suggéré. Cette tendance pourrait potentiellement expliquer la sortie accélérée des panicules au stade d'amorçage.

Enfin, les analyses de fragilité et les données recueillies lors de la récolte ont révélé que, suite à un dépôt de téphra, la production d'épillets est stimulée indépendamment du stade phénologique et de la quantité de téphra déposée. Cet effet positif est particulièrement accentué lorsque le téphra atteint la plantation à un stade précoce et avec une charge de 5 kg m^{-2} . En ce qui concerne la biomasse de paille, l'application de téphra exerce également un impact positif sur sa production, et ces effets sont également renforcés lors d'une application précoce et à une charge de 5 kg m^{-2} . Cependant, cette fois-ci, un dépôt de téphra aurait un impact négatif s'il atteint la culture au stade de floraison, tandis qu'un dépôt de téphra au stade d'amorçage ne semble pas exercer une influence significative sur la production de biomasse de paille.

En conclusion, l'étude menée a mis en évidence la faible vulnérabilité de la culture de riz, en particulier de la variété IR29, aux dépôts de téphra, contrastant avec les conclusions d'autres études portant sur des cultures telles que le chou, la laitue et les arbres fruitiers. Les mécanismes métaboliques du riz, sa résilience et la composition du téphra ont favorisé une augmentation de la production de grains de riz, surtout lorsque le téphra atteint la culture au début de la croissance. Bien que de futures études en conditions réelles soient nécessaires pour évaluer l'influence de l'ensemble des facteurs, la culture de riz de la variété IR29 se positionne comme un choix potentiellement recommandable pour les agriculteurs opérant dans des zones volcaniquement actives, où les conditions climatiques favorisent sa croissance.

Bibliographie

Antos, J. & Zobel, D.B. (1986). Recovery of forest understories buried by tephra from Mount St. Helens. *Plant ecology*. 64(2):103-111. doi :10.1007/BF00044786

Ayris, P.M. & Delmelle, P. (2012). The immediate environmental effects of tephra emission. *Bulletin of Volcanology*, doi:10.1007/s00445-012-0654-534

Bass M. (2017). Fiche de-la-culture-du-riz. <https://fr.slideshare.net/MamadouB/fiche-delacultureduriz>. Dernier accès : 7 juillet 2023.

Bernard, B & Moyen, J.F. (2011). Magmatisme et roches magmatiques - 3e édition. Dunod.

Bias S., Bonadonna C. & Houghton B. F. (2019). A step-by-step evaluation of empirical methods to quantify eruption source parameters from tephra-fall deposits. *Journal of Applied Volcanology*. 8(1). doi:10.1186/s13617-018-0081-1

Bignami C., Behncke B., Berger J. & Jenkins S. (2012). Handbook for volcanic risk management: prevention, crisis management and resilience. *BRGM Orleans*. doi:10.13140/2.1.2167.0083

Blake, D.M. (2015). The 2014 Eruption of Kelud Volcano, Indonesia: Impacts on Infrastructure, Utilities, Agriculture and Health. *GNS Science*. New Zealand

Blong R.J., Grasso P., Jenkins S., Magill C. R., Wilson T. M. , McMullan K. & Kandlbauer J., (2017). Estimating building vulnerability to volcanic ash fall for insurance and other purposes. *Journal of Applied Volcanology*. doi : 10.1186/s13617-017-0054-9

Bloodnick E. (2023). Le rôle du silicium en horticulture. *Pro-mix*. <https://www.pthorticulture.com/fr/zone-du-savoir/le-role-du-silicium-en-horticulture/>. Dernier accès : 2 janvier 2024

Bonadonna, C. & Houghton, B. (2005). Total grain-size distribution and volume of tephra-fall deposits. *Bull. Volcanol*. 67(5), 441–456, doi:10.1007/s00445-004-0386-2

Boroze T.T., Azouma Y.O., Ahanogbe K., Barate M. (2021). Séchage solaire de céréales : cinétiques, évaluations thermo-hygrométrique et énergétique. <https://centralesupelec.hal.science/hal-03353511/document> Dernier accès : 7 août 2023.

Caprais J. (2017). Quelles sont les zones volcaniques dans le monde. *Tout comment*. <https://education.toutcomment.com/article/quelles-sont-les-zones-volcaniques-dans-le-monde-4164.html> Dernier accès : 22 juillet 2023.

Chouraqui, F. & Texier, P. (2016). Pour un renforcement des capacités de gestion des crises volcaniques au Cap-Vert. *Dynamique environnementale*. p.70-97 <https://doi.org/10.4000/dynenviron.825>

Cohn F. (1884). *Aspergillus oryzae*, vol. 61, p. 226-230. https://wikimonde.com/article/Aspergillus_oryzae. Dernier accès : 1 août 2023.

Colette, C. (2018). L'activité interne du globe, chapitre 2 : Le volcanisme explosif. Mont St Helens. <https://slideplayer.fr/slide/11866809/> Dernier accès : 26 juillet 2023.

Cook, R. J., Barron, J. C., Papendick, R. I. & Williams, G. J. (1981). Impact on Agriculture of the Mount St. Helens Eruptions. *Science*. Vol 211, 16-22 doi : 10.1126/science.211.4477.16

Craig, H. M. (2015). Agricultural vulnerability to tephra fall impacts. *UC Library*. <http://dx.doi.org/10.26021/6184>

Craig, H.M., Wilson, T., Magill, C., Stewart C. & Wild A.J. (2021). Agriculture and forestry impact assessment for tephra fall hazard: Fragility function development and New Zealand scenario application. *Volcanica*. doi: <https://doi.org/10.30909/vol.04.02.345367>

Craig, H., Wilson, T., Stewart, C., Villarosa, G., Outes, V., Cronin, S. & Jenkins, S. (2016). Agricultural impact assessment and management after three widespread tephra falls in Patagonia, South America. *Natural Hazards*. 82(2):1167-1229. DOI:10.1007/s11069-016-2240-1

Couubaly, M.M.B. 1999. Etude de la résistance du riz (*Oryza* sp.) au virus de la panachure jaune du riz (RYMV)

Daffos, C. (2022). Transition explosive-effusive des éruptions volcaniques : étude expérimentale du développement de la porosité connectée des magmas siliceux riches en cristaux sous une déformation cisailante *HAL theses*. NNT : 2022ORLE1001.

Delmelle, P. (2003). Environmental impacts of tropospheric volcanic gas plumes. *Geological Society*. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.2003.213.01.23>

Delmelle, P., Lambert M., Dufrêne, Y., Gérin P. & Óskarsson, P. (2007). Gas/aerosol–ash interaction in volcanic plumes: New insights from surface analyses of fine ash particles. *Earth and Planetary Science Letters*. V259, N1, 159-170 <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.04.052>

Dembélé J.S. (2014). Gestion intégrée des engrais minéraux et des résidus de récolte dans un système de production intensif de riz-riz-blé au Sahel. https://www.memoireonline.com/08/15/9248/m_Gestion-integree-des-engrais-mineraux-et-des-residus-de-recolte-dans-un-systeme-de-production1.html. Dernier accès : 7 juillet 2023.

Desroches, A. (2013). The management of risks by the global risk analysis. *Transfusion Clinique et Biologique*. V20, 198-210. <https://doi.org/10.1016/j.traccli.2013.02.002>

Escale B. & Maunas L. (2015). Canicule précoce : les températures élevées perturbent la fécondation du maïs. *Arvalis* <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/les-temperatures-elevees-perturbent-la-fecondation-du-mais>. Dernier accès : 3 août 2023.

Eychenne, J., Le Pennec, J.L., Troncoso L., Gouhier, M. & Nedelec J.M. (2012). Causes and consequences of bimodal grain-size distribution of tephra fall deposited during the August 2006 Tungurahua eruption (Ecuador). *Bulletin of Volcanology*. 74(1):187-205. doi :10.1007/s00445-011-0517-5

FAO (2021). The impact of disasters and crises on agriculture and food security .URL <https://www.fao.org/3/cb3673en/cb3673en.pdf>. Dernier accès : 25 juillet 2023.

FAO (2020). Pressions exercées sur les ressources en terres dans un contexte de changement climatique. <https://www.fao.org/3/cb7654fr/online/src/html/chapter-1-1.html>. Dernier accès : 27 juillet 2023.

FAO (2018). Base de référence mondiale pour les ressources en sols 2014. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/I3794FR>. Dernier accès : 25 juillet 2023.

FAO (2018). Suivi du marché du riz de la FAO, Volume XXI, Numéro 1. URL <https://www.fao.org/documents/card/en/c/I9243FR> Dernier accès : 25 juillet 2023.

FAO (2015). The impact of natural hazards and disasters on agriculture, food security and nutrition. <https://www.fao.org/3/i5128e/i5128e.pdf>. Dernier accès : 25 juillet 2023.

FAO (2003). Guide d'identification des contraintes de terrain à la production de riz. <https://www.fao.org/3/y2778f/y2778f03.htm>. Dernier accès : 7 juillet 2023.

Froggatt P. C. & Lowe D. J. (2012). A review of late Quaternary silicic and some other tephra formations from New Zealand: Their stratigraphy, nomenclature, distribution, volume, and age. *Journal of Geology and Geophysics*. Vol 33, No 1. <https://doi.org/10.1080/00288306.1990.10427576>

Gertisser R., Preece, K. & Charbonnier, S. (2018). Tour du monde des volcans à surveiller de près. <https://theconversation.com/tour-du-monde-des-volcans-a-surveiller-de-pres-89571>. Dernier accès : 22 juillet 2023.

Grisson, L. (1990). Le riz du monde. <http://mappemonde-archive.mgm.fr/num10/internet/int06201.html>. Dernier accès : 22 juillet 2023.

GVP. (2013). Holocene Volcano List. https://volcano.si.edu/volcanolist_holocene.cfm. Dernier accès : 22 juillet 2023

Hagedorn F., Krause H.-M., Studer M., Schellenberger A. & Gattinger A. (2018): Sol et environnement. Matière organique du sol, émissions de gaz à effet de serre et atteinte physique des sols suisses. Synthèse thématique ST2 du Programme national de recherche «Utilisation durable de la ressource sol» (pnr 68), Berne

Helens. (2020). Qu'est-ce que l'Indice d'Explosivité Volcanique ?. <https://www.chosesasavoir.com/quest-lindice-dexplosivite-volcanique/>. Dernier accès : 25 juillet 2023.

Hinckley T.M., Imoto, H., Lee, K., Lackner, S., Morikawa, Y., Vogt K.A., Grier C., Keyes M.R., Teskey R & Seymour V. (1984). Impact of tephra deposition on growth in conifers: the year of the eruption. *Canadian Journal of Forest Research*. <https://doi.org/10.1139/x84-130>

Hirano, T., Kiyota M. & Aiga I. (1995). Physical effects of dust on leaf physiology of cucumber and kidney bean plants. *Environmental pollution*. V89, 255-261. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(94\)00075-O](https://doi.org/10.1016/0269-7491(94)00075-O)

IBM. (2021). ANOVA à 1 facteur : tests post hoc. <https://www.ibm.com/docs/fr/spss-statistics/beta>. Dernier accès : 14 août 2023.

Inbar, M. , Hubp, J.L. & Villers Ruiz, L. 1994. The geomorphological evolution of the Parícutin cone and lava flows, Mexico, 1943-1990. GéoProdig, Amsterdam.

INRAE, C. (2021). Riz paddy - Tables de composition et de valeur nutritionnelle des aliments pour animaux. <https://feedtables.com/fr/content/riz-paddy>. Dernier accès : 19 octobre 2023.

Irvine, T. N., & Baragar, W. R. (1971). A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 8, 523–548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>

Iten A. & Gugger K. (2021). La force des volcans dans le sol. <https://www.ufarevue.ch/fre/production-vegetale/la-force-des-volcans-dans-le-sol>. Dernier accès : 23 juillet 2023.

Izett G. & Wilcox R. (1982). Map showing localities and inferred distributions of the Huckleberry Ridge, Mesa Falls, and Lava Creek ash beds (Pearlette family ash beds) of Pliocene and Pleistocene age in the western United States and southern Canada. *Semantic*. DOI:10.3133/I1325

Jenkins, S.F., Spence, R., Fonseca, J.F., Solidum R. & Wilson T.M. (2014). Volcanic risk assessment: Quantifying physical vulnerability in the built environment . Journal of Volcanology and Geothermal Research. V276, 105-120. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.03.002>

Karuga, J. (2022). Production et activités post-récolte du riz au Ghana. <https://scripts.farmradio.fm/fr/texte-radiophonique/fiche-documentaire-production-et-activites-post-recolte-du-riz-au-ghana/>. Dernier accès : 7 juillet 2023.

Kruasuwan W., Lohmaneeratana K., Munnoch J.T., Vongsangnak W., Jantrasuriyarat C., Hoskisson P.A. & Thamchaipenet A. (2023). Transcriptome Landscapes of Salt-Susceptible Rice Cultivar IR29 Associated with a Plant Growth Promoting Endophytic Streptomyces. Pubmed. doi : 10.1186/s12284-023-00622-7

Kushnir A., Martel, C., Champallier, R. & Arbaret, L. (2017). In situ confirmation of permeability development in shearing bubble-bearing melts and implications for volcanic outgassing Earth and Planetary Science Letters. V 458, 315-326. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.10.053>

Krystyna Brown S., Loughlin S., Sparks, R.S.J., Vye-Brown C. (2015). Global volcanic hazards and risk: Summary background paper for the Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2015. doi :10.1017/CBO9781316276273.004

Lacharme. (2001). Différents stades du cycle du riz. <https://www.rapport-gratuit.com/differents-stades-du-cycle-du-riz/>. Dernier accès : 7 juillet 2023.

Lavigne, F. & De Belizal, E. (2010). Les effets géographiques des éruptions volcaniques. *EchoGéo*. doi :10.4000/echogeo.12226

Lavigne, F. & Thouret, J.C. (1994). Proposition d'une méthode d'évaluation et de cartographie des risques liés aux lahars sur le volcan Merapi (Java, Indonésie). *Revue de géographie alpine*. 82(4). doi :10.3406/rga.1994.3781

Lerot, B. (2006). Les éléments minéraux. https://www.doc-developpement-durable.org/file/Culture/Fertilisation-des-Terres-et-des-Sols/Chimie-des_sols/ElementsMineraux.pdf. Dernier accès : 27 decemnre 2023.

Ligot, N., Bogaert, P., Biass, S., Lobet, G. & Delmelle P. (2022). Grain size modulates volcanic ash retention on crop foliage and potential yield loss. *EGUsphere*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-687>

Ligot, N., Viera, W., Peñaherrera, D., Bernard, B., Bogaert, P. & Delmelle P. (2023). A quantitative assessment of crop vulnerability to tephra hazard at Tungurahua volcano, Ecuador: understanding the effect of volcanic and biological factors. doi :10.21203/rs.3.rs-2915673/v1

Liu, E. J., Cashman, K. V. & Rust, A. C. (2015). Optimising shape analysis to quantify volcanic ash morphology. *GeoResJ*. 8, 14–30. <https://doi.org/10.1016/j.grj.2015.09.001>

López A. (2023). La baisse de la production mondiale de riz affecte la sécurité alimentaire. Atalayar <https://www.atalayar.com/fr/articulo/economie-et-entreprises/la-baisse-de-la-production-mondiale-de-riz-affecte-la-securite-alimentaire/20230425130928184065.html>. Dernier accès : 22 juillet 2023.

Lowell S., Shields J.E., Martin A., & Thommes M. 2004. Characterization of Porous Solids and Powders: Surface Area, Pore Size and Density. Particle Technology Series (POTS, volume 16)

McGuire B. (2003) Volcano instability and lateral collapse. https://www.researchgate.net/publication/228606153_Volcano_instability_and_lateral_collapse. Dernier accès : 22 juillet 2023.

McLaren, R.G. and Cameron, K.C. (1996). Soil Science: Sustainable Production and Environmental Protection. 2nd Edition, Oxford University Press, Auckland, New Zealand, 340.

Mecklenburg, U. (2005). Carte Isopach pour le gisement de tephra Rio Blanco. <http://www.geo.utexas.edu/faculty/barker/kempton/rbtephra.html>. Dernier accès : 25 juillet 2023.

Meier, U. (2001). Stades phénologiques des mono-et dicotylédones cultivées. https://centrefrancaisduriz.fr/maj/upload/document/document_121.pdf. Dernier accès : 12 juillet 2023.

Miller, C. F. (1967). Operation ceniza-arena: The retention of fallout particles from volcan Irazu (Costa Rica) by plant and people. Stanford Research Institute, San Francisco, California, MU-4890.

Newhall, C. G. & Self, S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *J. Geophys. Res.: Oceans* 87, 1231–1238, doi.org/10.1029/JC087iC02p01231

Olafur A. (2013). Chapter Six - The Influence of Volcanic Tephra (Ash) on Ecosystems, *Advances in Agronomy* Volume 121, Pages 331-380. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407685-3.00006-2>

Phan Thi Hong Nhung (Ms.), Lecturer at Department of Food Crops Science, Faculty of Agronomy, Vietnam National University of Agriculture.

Picquout A. (2015). Impacts géographiques de l'éruption de 2010 du volcan Merapi, Java, Indonésie. <https://theses.hal.science/tel-01243680v1/document>. Dernier accès : 8 août 2023.

Qaddah, B. (2020). Modélisation numérique de la dynamique et de l'évolution thermique d'une goutte métallique en chute libre dans un milieu visqueux. <https://www.theses.fr/2020AIXM0139>. Dernier accès : 7 août 2023.

Quant, P. (1972). Note sur la nature et la fertilité des sols sur cendres volcaniques provenant d'éruptions récentes dans l'archipel des Nouvelles-Hébrides : 1ère partie et 2ème partie. *Cahiers ORSTOM.Série Pédologie*, 10 (2), p. 123-151. ISSN 0029-7259.

Reuters. (2018). Des agriculteurs philippins intrépides défient la colère du volcan Mayon. <https://www.straitstimes.com/asia/se-asia/fearless-philippine-farmers-defy-mayon-volcano-anger>. Dernier accès : 14 août 2023.

Riley, C., Rose, W. & Bluth, G. (2003). Quantitative shape measurements of distal volcanic ash. *Journal of Geophysical Research*. 108(B10). <https://doi.org/10.1029/2001JB000818>

Rose, W., Self, S., Murrow, P., Bonadonna, C., Durant, A. & Ernst, G. (2008). Nature and significance of small volume fall deposits at composite volcanoes: Insights from the October 14, 1974 Fuego eruption, Guatemala. *Bulletin of Volcanology*, 70(9) pp. 1043–1067. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00445-007-0187-5>

Santos, M., Sanglard, L., Barbosa, M., Namorato, F., Melo, M., Franco W., Pérez-Molina J., Martins S., DaMatta, F. (2020). Silicon nutrition mitigates the negative impacts of iron toxicity on rice photosynthesis and grain yield. *Ecotoxicology and environmental safety*. V189. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110008>

Samaniego, P. Le Pennec J.L., Robin C. & Hidalgo S. (2011). Petrological analysis of the pre-eruptive magmatic process prior to the 2006 explosive eruptions at Tungurahua volcano (Ecuador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. V 199, 69-84. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.10.010>

Saxby, J., Beckett, F., Cashman, K., Rust, A. & Tennant, E. (2018). The impact of particle shape on fall velocity: Implications for volcanic ash dispersion modelling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. V362, 32-48. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.08.006>

Scollo, S., Prestifilippo, M., Bonadonna, C., Cioni R., Corradini S., Degruyter W. & Rossi E. (2019). Near-Real-Time Tephra Fallout Assessment at Mt. Etna, Italy. *Remote Sens*, 11(24), 2987. <https://doi.org/10.3390/rs11242987>

Shoji S., Dahlgren R. & Nanzyo M. (1993). Chapter 2 Morphology of Volcanic Ash Soils Developments in Soil Science. V 21, 7-35. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70263-0](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70263-0)

Smith, W., & Hurst, T. (2010). Volcanic ashfall in New Zealand ± probabilistic hazard modelling for multiple sources. *Journal of Geology and Geophysic*. 53(1), 1±14. <https://doi.org/10.1080/00288301003631129>

SNHF. (2022). Les éléments nutritifs des plantes. <https://www.jardiner-autrement.fr/elements-nutritifs-plantes/#:~:text=Le%20potassium%20pour%20l'assimilation,la%20conservation%20des%20l%C3%A9gumes%20racines>. Dernier accès : 15 novembre 2023.

Stassart C. (2022). Des cultures adaptées à l'aléa volcanique. *Daily science*. <https://dailyscience.be/01/03/2022/des-cultures-adaptees-a-lalea-volcanique/>. Dernier accès : 23 juillet.2023.

Sword-Daniels, V. L., Rossetto, T., Wilson, T. M. & Sargeant, S. (2015) Interdependence and dynamics of essential services in an extensive risk context: a case study in Montserrat, West Indies. *NHESS*. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-947-2015>

Tabuk. (2021). Harvest management : harvested the crop at the right time. rice competitiveness enhancement fund. <https://www.coursehero.com/file/95945737/15-keycheck-8pptx/>. Dernier accès : 7 août 2023.

Thompson, M.A., Lindsay, J.M., Wilson T.M., Biass S. & Sandri L. (2016). Quantifying risk to agriculture from volcanic ashfall: a case study from the Bay of Plenty, New Zealand. *Natural Hazards*. Volume 86, pages 31–56. doi :10.1007/s11069-016-2672-7

Tian, J. & Philpot, W.D. (2015). Relationship between surface soil water content, evaporation rate, and water absorption band depths in SWIR reflectance spectra. *Remote Sensing of Environment*. V 169, 280–289. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.007>

Trébuil, G. (2004). Rizicultures asiatiques. <https://www.gis-reseau-asie.org/fr/rizicultures-asiatiques>. Dernier accès : 22 juillet 2023.

Vautherot, A. (2016). La culture en pot : Avantages Et Inconvénients. <https://www.gralon.net/articles/maison-et-jardin/jardin/article-la-culture-en-pot---avantages-et-inconvenients-9609.htm>. Dernier accès : 20 décembre 2023.

Volcanica. Impact of Eruption on Civilisation (2022). <http://photovolcanica.com/VolcanoInfo/Sinabung/Sinabung.html>. Dernier accès : 9 août 2023.

Walgraffe, Y. (2018). Influence de la biodisponibilité du silicium dans le sol sur les défenses naturelles des plantes contre les bioagresseurs. https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/5085/1/TFE_Yseult_Walgraffe.pdf.

Wang, B., Michaelson, G., Ping, C.-L., Plumlee, G., & Hageman, P. (2008). Characterization of Pyroclastic Deposits and Pre-eruptive Soils following the 2008 Eruption of Kasatochi Island Volcano, Alaska. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 276-284. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-42.3.276>

Wilson T.M. & Kaye G.D., 2007. Agricultural fragility estimates for volcanic ash fall hazards. GNS Science. 51 pages

Witham, C., Oppenheimer, C. & Horwell, C. (2005). Volcanic ash-leachates: a review and recommendations for sampling methods. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. V141, 299-326. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.11.010>

Zimanowski, B., Wohletz, K., Dellino P. & Büttner R. (2003). The volcanic ash problem. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. V 122, 1-5. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00471-7](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00471-7)

Zingore S., Wairegi L. & Ndiaye M.K. (2014). Guide pour la gestion des systèmes de culture de riz. <https://africasoilhealth.cabi.org/wpcms/wp-content/uploads/2016/06/French-Rice-Guide-A4-BW-lowres.pdf>. Dernier accès : 22 septembre 2023.

Appendices



Figure A-1 : Culture réel en fin d'expérience

Dénomination

Pour différencier les plantes, les labels est utilisés (Figure A-2). Un label reprend le stade phénologique de la plante testé, l'épaisseur de téphra appliqué, le bac relatif et sa position dans ce dernier.

ST0,5_1.1				1.1	1.2.	1.3
				1.4	1.5	1.6
				2.1	2.2.	2.3
				2.4	2.5	2.6
				3.1	3.2.	3.3
				3.4	3.5	3.6

1/3 d'un test

Figure A-2 : Dénomination utilisé

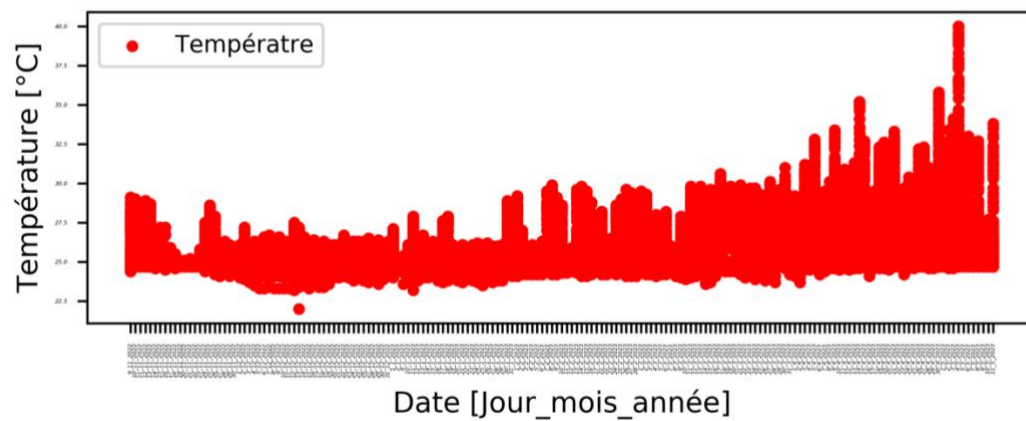


Figure A-3 : Évolution de la température au cours de l'expérience

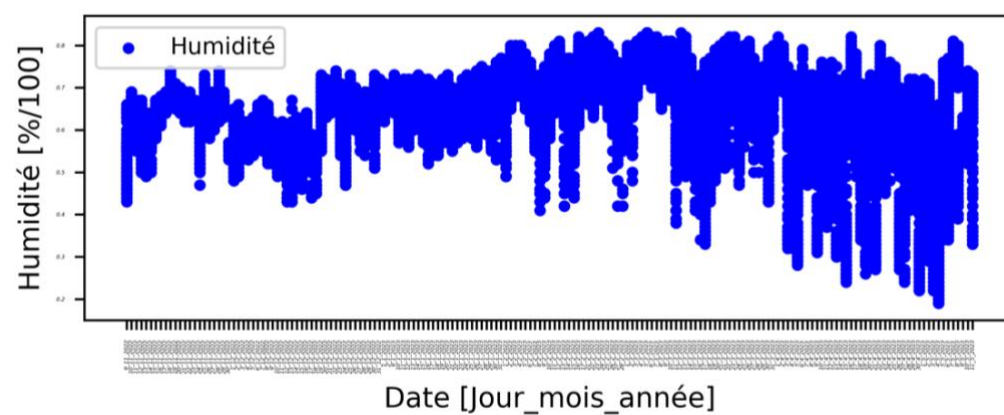


Figure A-4 : Évolution de l'humidité au cours de l'expérience

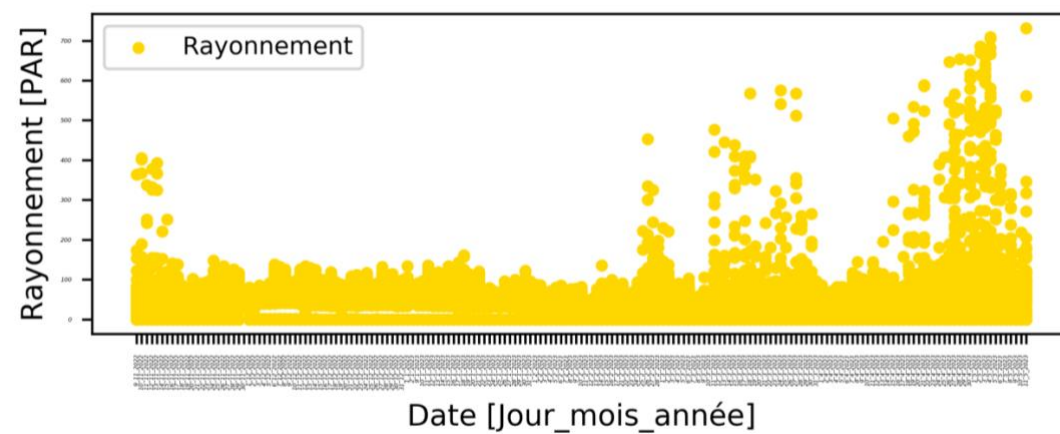


Figure A-5 : Évolution du rayonnement au cours de l'expérience

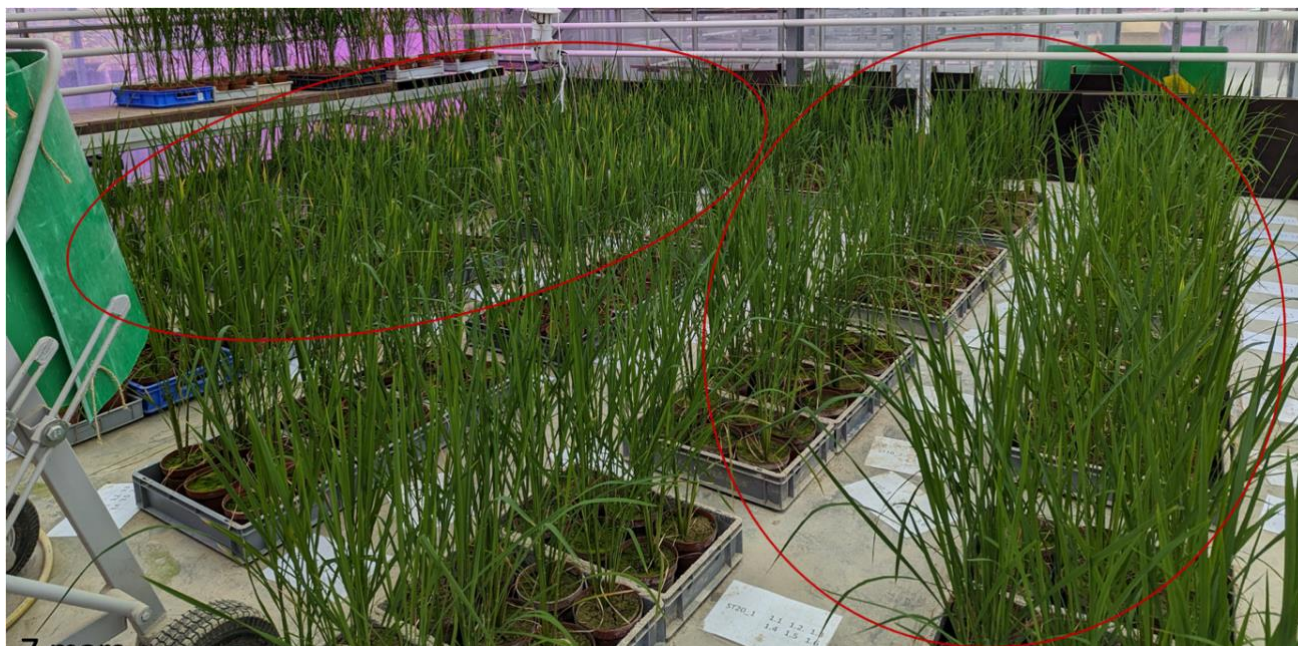


Figure A-6 : Photo de carence en potassium des plantes du stade d'amorçage et de floraison, 14 semaines après repiquage.



Figure A-7 : Arroseur pour le nettoyage des plantes

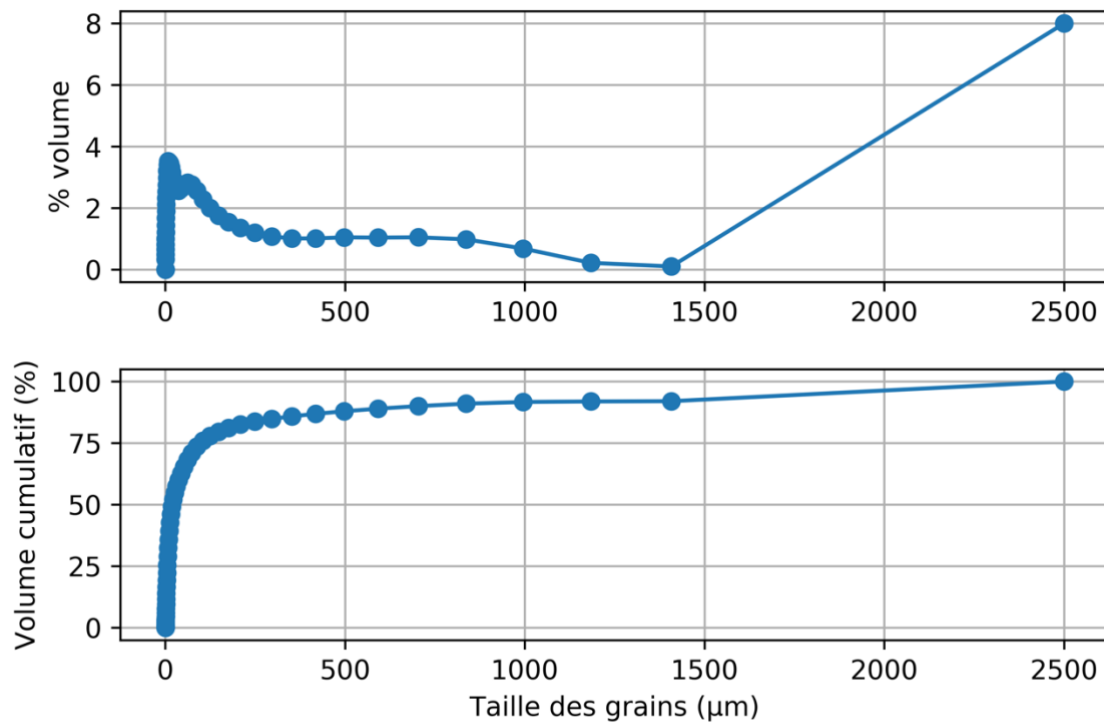


Figure A-8 : Granulométrie

Tableau A-1 : Calcul du % de fraction de téphra > 2mm

	Poid total (gramme)	Poid < 2 mm (gramme)	Poid >2mm (gramme)	Fraction >2mm (%)
Big bag bas_surface	133,16	121,9	11,95	8,97
Big bag_fond	92,36	86,68	6,66	7,21
Big bag haut_surface	230	211,92	19,21	8,35
Big bag haut_fond	280,3	259,72	20,89	7,45
Moyenne				7,99

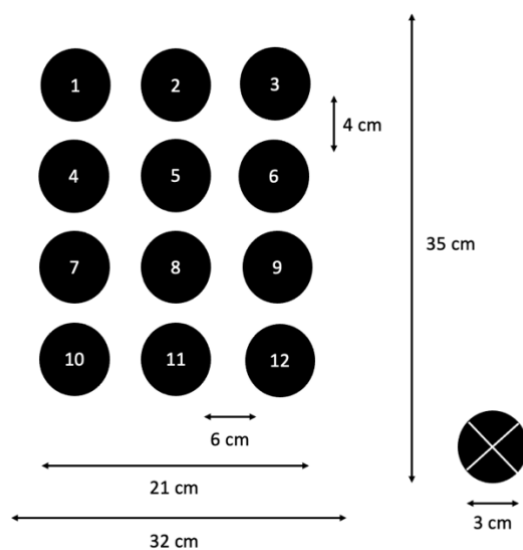


Figure A-9 : Répartition des différents pots pour la prise de données pour le test d'homogénéité par le tamis 4 mm



Figure A-10 : Représentation réel du test d'homogénéité avec tamis à 1 m

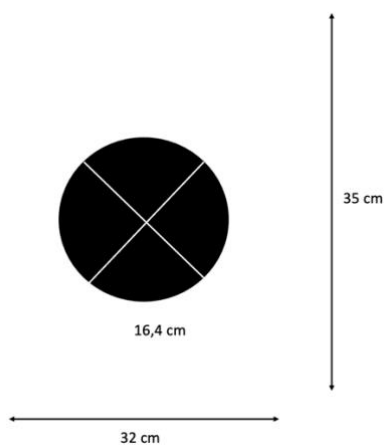


Figure A-11 : Répartition du pot pour la prise de données pour la quantité de téphra dans l'eau pour le test de tamis 4 mm

Tableau A-2: test homog tamis 4 mm

Qt attendu par bouchon [kg]		0,000353		0,35	
Test 1					
Emplacement pot		Poids pot vide (g)		Poids sans pot (g)	
1	3,22	3,30	0,08		
2	3,21	4,03	0,82		
3	3,23	3,39	0,16		
4	3,23	3,64	0,41		
5	3,22	4,67	1,45		
6	3,23	3,64	0,41		
7	3,21	3,98	0,77		
8	3,21	4,38	1,17		
9	3,24	3,44	0,20		
10	3,22	3,41	0,19		
11	3,21	3,56	0,35		
12	3,21	3,26	0,05		
Test 2					
Emplacement pot		Poids avec pot (g)		Poids sans pot (g)	
1	3,49	0,19	3,59	0,18	
2	4,59	0,56	5,16	1,39	
3	3,46	0,07	3,75	0,45	
4	4,13	0,49	4,48	0,76	
5	5,85	1,18	7,22	2,82	
6	3,83	0,19	4,38	0,96	
7	3,42	1,09	4,34	1,66	
8	3,46	1,07	5,45	2,45	
9	3,23	0,07	3,94	0,47	
10	3,92	0,51	4,07	0,34	
11	3,95	0,39	4,26	0,66	
12	3,33	0,07	3,34	0,06	
Moyenne		Test 1		Test 2	
Quantité manquante moyenne [kg]		0,51		0,49	
Quantité par pot par rapport à la quantité requise [kg]		0,35		0,35	
% de quantité par pot		-0,15		-0,13	
Ecart-type		1,43		0,72	
		0,45		0,41	
QT CENDRE DS EAU					
Test		Poids pot vide (g)		Poids avec pot (g)	
Test 1	42,53	71,03	28,50		
Test 2	43,41	74,23	30,42		
Test 3	44,39	61,70	17,31		
Moyenne		25,54		Qt attendu	
				55,00	
				% cendre dans le pot	
				0,46	

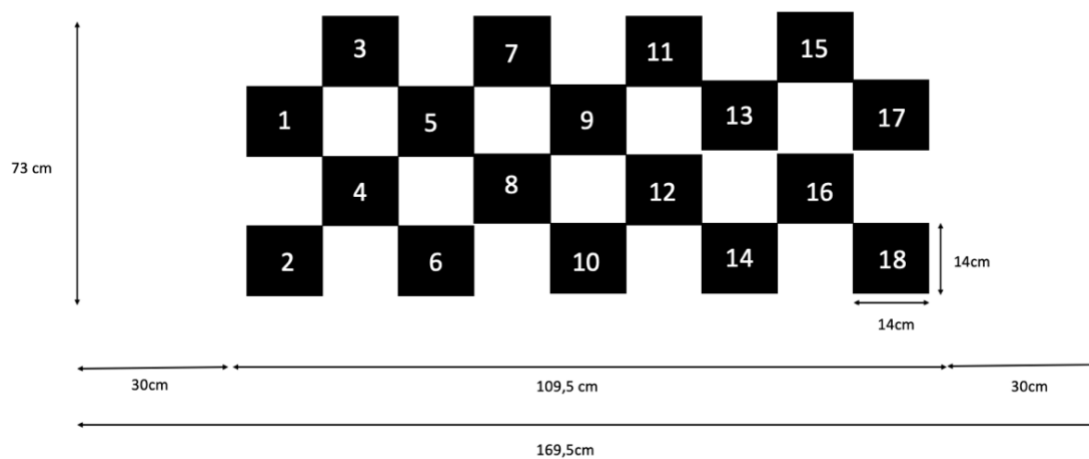


Figure A-12 : Répartition des différents pots pour la prise de données pour le test d'homogénéité par l'épandeur

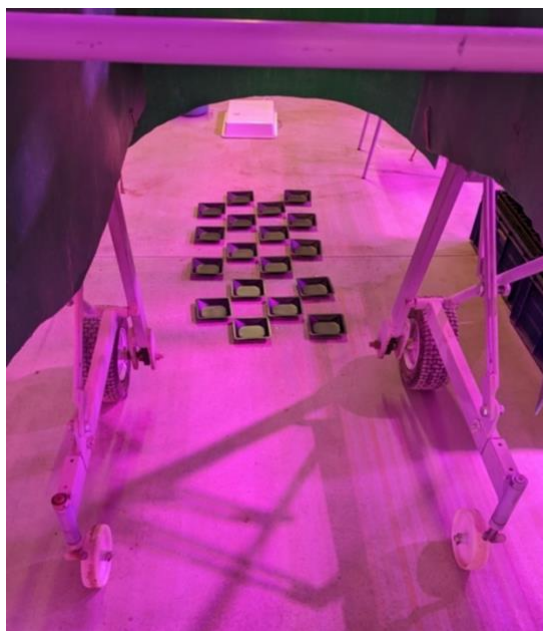


Figure A-13 : Représentation réel du test d'homogénéité avec l'épandeur

Tableau A-3 : Poids du téphra résultant du test d'homogénéité pour les épaisseurs 5,5kg et 11kg avec l'épandeur

Pour 5,5 kg						Pour 11 kg	
Emplacement pot	Poid pot noir (vide) [g]	Poid de cendre avec pot [g]	Poid de cendre sans pot [g]	Poid de cendre avec pot [g]	Poid de cendre sans pot [g]		
	1	646	5438	4847	10705	100,59	
	2	619	7255	6636	15346	147,71	
	3	622	8575	7953	15846	152,84	
	4	627	8211	7584	18546	178,89	
	5	617	6557	594	12209	115,92	
	6	609	8399	775	15715	151,06	
	7	633	8642	7969	15449	147,96	
	8	606	8442	7816	18478	178,72	
	9	623	6987	6364	14157	135,34	
	10	615	7675	706	15784	151,69	
	11	604	979	9186	17334	167,3	
	12	611	9165	8554	20435	198,24	
	13	612	5903	5903	12932	123,2	
	14	604	6957	6353	15576	149,72	
	15	621	7163	6542	14384	137,63	
	16	624	7298	6674	16402	157,78	
	17	602	701	6408	12384	117,82	
	18	66	6353	5693	13245	125,85	
		Moyenne	695733333	87,22	1465144444	174,048	
		Quantité manquante moyenne (kg)	17,64666667	0,797676374	27,53355556	0,841804815	
		Quantité par pot par rapport à la quantité requ	0,797676374	10,76870414	24,80550466	24,80550466	
		% de quantité par pot					
		Ecart type					
QT CENDRE DS EAU							
Surface totale couverte [m²]	1,23735						
Surface 1 bac gris [m²]	0,2044						
Surface 1 pots rouges [m²]	0,021124669						
Surface d'eau non couverte dans 1 bac gris [m²]	0,077655586						
Qt cendre dans 1 bac gris [kg]	0,908545472						
				3,380760769	3,725438546		
Epaisseur [kg/m²]	Qt cendre pour toute la surface [kg]	Qt cendre pour 1 bac gris [kg]	Qt cendre appliqué dans l'eau (dans 1 b Qt cendre sur 6 pots rouges [kg]	Proportion dans l'eau (%)	Proportion pour 6 pots rouge(%)		
4,5	55	0,908545472	0,345177777	0,563376795	0,379919687	0,620080303	



Figure A-14 : Compteur de semence automatique de Marbaix



Figure A-15 : Plante mortes prématurément



Figure A-16 : Plante non développée

Tableau A-4 : Données hebdomadaires, moyenne et écart type de la hauteur des témoins au cours de l'expérience

Date	TIR29 1.1	TIR29 1.4	TIR29 1.6	TIR29 2.1	TIR29 2.2	TIR29 2.3	TIR29 2.4	TIR29 2.5	TIR29 2.6	TIR29 3.1	TIR29 3.2	TIR29 3.3	TIR29 3.4	TIR29 3.5	TIR29 3.6
10_11_2022	5,80	7,20	7,20	7,00	8,50	7,50	8,00	7,50	9,00	8,50	8,00	7,00	6,00	7,00	8,00
16_11_2022	8,50	10,00	10,50	9,00	9,00	12,50	12,00	12,00	12,00	11,00	10,00	10,00	10,00	10,00	11,00
23_11_2022	14,00	12,00	17,00	14,00	15,00	14,00	15,00	15,00	18,00	16,00	12,00	17,00	17,00	17,00	13,00
28_11_2022	15,00	14,00	18,00	16,00	16,00	19,00	18,00	19,00	20,00	18,00	14,00	17,00	18,00	19,00	14,00
5_12_2022	20,00	18,00	22,00	19,00	21,00	24,00	20,00	23,00	23,00	21,00	18,00	21,00	24,00	22,00	15,00
12_12_2022	23,00	23,00	22,00	27,00	25,00	25,00	23,00	24,00	27,00	28,00	24,00	29,00	27,00	27,00	24,00
19_12_2022	29,00	31,00	29,00	33,00	33,00	35,00	31,00	32,00	36,00	35,00	32,00	36,00	35,00	30,00	32,00
26_12_2022	39,00	40,00	39,00	40,00	39,00	41,00	39,00	37,00	39,00	43,00	39,00	35,00	44,00	37,00	37,00
3_01_2023	50,00	50,00	53,00	53,00	42,00	56,00	44,00	51,00	57,00	54,00	50,00	55,00	46,00	52,00	52,00
10_01_2023	59,00	59,00	61,00	61,00	58,00	65,00	58,00	58,00	63,00	65,00	60,00	65,00	67,00	59,00	62,00
16_01_2023	64,00	63,00	67,00	64,00	65,00	68,00	64,00	58,00	77,00	70,00	60,00	75,00	70,00	69,00	69,00
24_01_2023	72,00	71,00	80,00	70,00	69,00	80,00	66,00	80,00	78,00	70,00	71,00	81,00	79,00	80,00	73,00
6_02_2023	78,00	79,00	85,00	79,00	82,00	88,00	79,00	85,00	78,00	86,00	83,00	82,00	81,00	86,00	80,00
13_02_2023	89,00	83,00	89,00	85,00	88,00	92,00	78,00	71,00	89,00	82,00	77,00	85,00	83,00	92,00	91,00
20_02_2023	92,00	86,00	93,00	88,00	88,00	96,00	89,00	90,00	88,00	91,00	89,00	88,00	90,00	93,00	92,00
27_02_2023	92,00	90,00	85,00	96,00	82,00	95,00	92,00	89,00	87,00	94,00	91,00	91,00	88,00	93,00	89,00
7_03_2023	93,00	90,00	85,00	89,00	93,00	91,00	91,00	89,00	88,00	92,00	91,00	91,00	92,00	95,00	91,00
13_03_2023	94,00	90,00	85,00	90,00	83,00	94,00	85,00	87,00	87,00	91,00	91,00	91,00	93,00	88,00	91,00
20_03_2023	97,00	88,00	81,00	87,00	93,00	104,00	89,00	91,00	91,00	94,00	87,00	94,00	94,00	93,00	91,00
27_03_2023	94,00	89,00	96,00	92,00	93,00	96,00	92,00	87,00	91,00	92,00	90,00	92,00	92,00	91,00	94,00
3_04_2023	93,00	87,00	91,00	90,00	92,00	103,00	92,00	89,00	91,00	90,00	90,00	91,00	93,00	99,00	95,00
11_04_2023	94,00	90,00	90,00	88,00	82,00	91,00	84,00	92,00	77,00	92,00	95,00	92,00	90,00	87,00	92,00
17_04_2023	93,00	90,00	84,00	91,00	94,00	103,00	81,00	88,00	91,00	89,00	92,00	91,00	94,00	89,00	86,00

Date	TIR29 4.1	TIR29 4.2	TIR29 4.3	TIR29 4.4	TIR29 4.5	TIR29 4.6	TIR29 5.1	TIR29 5.2	TIR29 5.3	TIR29 5.4	TIR29 5.5	TIR29 5.6	TIR29 6.2	TIR29 6.3	Moyenne	Ecart-type
10_11_2022	6,50	8,00	7,00	9,00	7,00	10,50	7,50	8,50	7,00	8,50	7,00	9,50	8,50	6,00	7,75	1,04
16_11_2022	9,00	11,00	11,00	11,00	10,00	13,00	11,00	10,00	10,00	10,00	12,00	12,00	10,00	10,00	10,60	1,14
23_11_2022	15,00	17,00	15,00	13,00	15,00	17,00	18,00	14,00	16,00	17,00	15,00	16,00	14,00	17,00	15,34	1,70
28_11_2022	18,00	19,00	17,00	15,00	16,00	19,00	20,00	16,00	17,00	19,00	19,00	17,00	15,00	18,00	17,24	1,83
5_12_2022	22,00	23,00	21,00	20,00	21,00	24,00	24,00	21,00	21,00	21,00	23,00	25,00	20,00	24,00	21,41	2,21
12_12_2022	29,00	27,00	25,00	27,00	27,00	26,00	25,00	24,00	25,00	25,00	24,00	24,00	23,00	25,00	25,31	1,87
19_12_2022	35,00	33,00	34,00	32,00	33,00	32,00	33,00	32,00	32,00	33,00	33,00	32,00	29,00	34,00	32,62	1,93
26_12_2022	43,00	39,00	39,00	36,00	39,00	45,00	40,00	40,00	40,00	35,00	41,00	37,00	35,00	38,00	39,14	2,53
3_01_2023	54,00	48,00	55,00	49,00	51,00	57,00	52,00	43,00	55,00	51,00	50,00	45,00	46,00	45,00	50,55	4,23
10_01_2023	66,00	63,00	66,00	58,00	62,00	71,00	59,00	63,00	67,00	58,00	62,00	58,00	56,00	58,00	61,62	3,68
16_01_2023	69,00	69,00	67,00	68,00	63,00	71,00	73,00	66,00	74,00	69,00	64,00	66,00	66,00	66,00	67,38	4,25
24_01_2023	72,00	81,00	76,00	74,00	74,00	72,00	73,00	75,00	72,00	76,00	72,00	70,00	70,00	79,00	74,34	4,25
6_02_2023	79,00	84,00	81,00	81,00	77,00	82,00	89,00	78,00	85,00	83,00	88,00	80,00	82,00	82,00	82,14	3,30
13_02_2023	80,00	88,00	83,00	83,00	82,00	86,00	93,00	71,00	88,00	82,00	85,00	84,00	82,00	90,00	84,52	5,59
20_02_2023	88,00	90,00	91,00	89,00	83,00	92,00	97,00	84,00	89,00	85,00	98,00	86,00	91,00	93,00	89,97	3,57
27_02_2023	86,00	88,00	94,00	89,00	85,00	94,00	97,00	88,00	88,00	86,00	92,00	87,00	80,00	98,00	89,86	4,34
7_03_2023	88,00	88,00	93,00	87,00	88,00	89,00	93,00	85,00	88,00	75,00	95,00	78,00	83,00	92,00	89,07	4,54
13_03_2023	88,00	89,00	92,00	88,00	91,00	90,00	95,00	85,00	81,00	87,00	93,00	87,00	84,00	95,00	89,14	3,67
20_03_2023	92,00	94,00	93,00	89,00	91,00	94,00	96,00	83,00	84,00	85,00	92,00	90,00	82,00	96,00	90,86	4,98
27_03_2023	88,00	86,00	93,00	84,00	87,00	97,00	95,00	86,00	87,00	76,00	92,00	76,00	80,00	97,00	89,83	5,55
3_04_2023	91,00	85,00	92,00	87,00	88,00	93,00	95,00	79,00	86,00	72,00	92,00	70,00	89,00	95,00	89,66	6,76
11_04_2023	89,00	83,00	90,00	86,00	92,00	94,00	89,00	70,00	88,00	72,00	90,00	66,00	81,00	82,00	86,48	7,36
17_04_2023	75,00	86,00	89,00	87,00	87,00	87,00	96,00	76,00	86,00	86,00	91,00	67,00	70,00	82,00	86,82	7,70

Tableau A-5 : Données hebdomadaires, moyenne et écart type de la hauteur des plantes ayant reçu 0,5, 5, 10 , 20 et 40 kg m⁻² de téphra au stade plantule au cours de l'expérience

0,5 kg/m²

Date	SPI0,5_1.1	SPI0,5_1.2	SPI0,5_1.3	SPI0,5_1.5	SPI0,5_1.6	SPI0,5_2.2	SPI0,5_2.3	SPI0,5_2.4	SPI0,5_2.5	SPI0,5_2.6	SPI0,5_3.1	SPI0,5_3.2	SPI0,5_3.3	SPI0,5_3.4	SPI0,5_3.5	SPI0,5_3.6	Moyenne	Ecart-type
10_11_2022	7,00	7,00	7,50	8,50	8,00	5,50	7,50	6,00	7,50	6,50	6,00	7,00	6,00	7,00	7,00	9,00	7,06	0,95
16_11_2022	9,00	8,00	11,00	9,50	10,00	9,00	12,00	10,00	8,50	10,00	6,50	11,00	7,00	10,00	8,00	10,00	9,34	1,48
23_11_2022	10,00	8,00	11,00	9,50	13,00	11,00	14,00	11,00	11,00	11,00	6,50	12,00	9,00	14,00	8,00	12,00	10,69	2,13
28_11_2022	12,00	10,00	13,00	12,00	16,00	14,00	17,00	16,00	13,00	15,00	9,00	17,00	11,00	17,00	14,00	12,00	13,63	2,55
5_12_2022	16,00	13,00	16,00	14,00	17,00	14,00	17,00	17,00	16,00	16,00	12,00	18,00	13,00	21,00	15,00	11,00	15,38	2,50
12_12_2022	16,00	14,00	19,00	16,00	20,00	20,00	23,00	22,00	20,00	22,00	14,00	20,00	17,00	26,00	20,00	17,00	19,13	3,30
19_12_2022	21,00	16,00	23,00	20,00	25,00	24,00	28,00	26,00	25,00	24,00	23,00	28,00	21,00	32,00	28,00	21,00	24,06	3,89
26_12_2022	23,00	23,00	27,00	22,00	28,00	30,00	32,00	35,00	28,00	30,00	25,00	31,00	27,00	35,00	34,00	26,00	28,50	4,20
3_01_2023	32,00	31,00	36,00	28,00	42,00	44,00	46,00	47,00	41,00	44,00	37,00	41,00	37,00	45,00	46,00	41,00	39,88	5,82
10_01_2023	38,00	43,00	44,00	36,00	51,00	52,00	55,00	58,00	51,00	53,00	45,00	48,00	43,00	57,00	57,00	45,00	48,50	6,80
16_01_2023	49,00	44,00	53,00	43,00	52,00	55,00	56,00	61,00	52,00	55,00	48,00	57,00	47,00	70,00	63,00	49,00	53,38	7,12
24_01_2023	51,00	58,00	58,00	48,00	56,00	60,00	56,00	64,00	52,00	61,00	56,00	64,00	54,00	75,00	67,00	62,00	58,88	6,69
6_02_2023	68,00	62,00	71,00	62,00	79,00	75,00	79,00	81,00	73,00	78,00	68,00	77,00	70,00	85,00	77,00	73,00	73,63	6,53
13_02_2023	75,00	79,00	76,00	70,00	80,00	76,00	89,00	88,00	75,00	83,00	81,00	80,00	75,00	88,00	83,00	81,00	79,94	5,40
20_02_2023	83,00	85,00	81,00	79,00	74,00	90,00	92,00	78,00	77,00	90,00	82,00	85,00	80,00	93,00	88,00	81,00	83,63	5,67
27_02_2023	84,00	87,00	84,00	80,00	89,00	86,00	84,00	91,00	84,00	93,00	87,00	87,00	76,00	91,00	87,00	83,00	85,81	4,26
7_03_2023	88,00	88,00	86,00	75,00	95,00	90,00	90,00	92,00	87,00	89,00	80,00	85,00	78,00	93,00	90,00	83,00	86,81	5,49
13_03_2023	87,00	93,00	84,00	82,00	90,00	90,00	91,00	86,00	87,00	90,00	88,00	89,00	81,00	95,00	88,00	83,00	87,73	4,03
20-03_2023	89,00	89,00	88,00	83,00	85,00	86,00	91,00	91,00	85,00	89,00	90,00	85,00	79,00	97,00	88,00	78,00	87,06	4,68
27_03_2023	86,00	93,00	89,00	84,00	97,00	92,00	90,00	94,00	87,00	90,00	88,00	88,00	92,00	99,00	86,00	81,00	89,75	4,68
3_04_2023	94,00	95,00	92,00	88,00	96,00	92,00	91,00	92,00	84,00	89,00	81,00	88,00	77,00	94,00	84,00	83,00	88,75	5,54
11_04_2023	95,00	95,00	87,00	85,00	95,00	88,00	90,00	91,00	86,00	91,00	81,00	88,00	80,00	97,00	90,00	83,00	88,88	5,12
17_04_2023	95,00	93,00	85,00	75,00	95,00	90,00	91,00	88,00	79,00	92,00	89,00	87,00	79,00	99,00	89,00	81,00	87,94	6,66

5 kg/m²

Date	SPI5_1.1	SPI5_1.3	SPI5_1.4	SPI5_1.5	SPI5_2.2	SPI5_2.4	SPI5_3.1	SPI5_3.2	SPI5_3.4	SPI5_3.5	Moyenne	Ecart-type
10_11_2022	6,20	10,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	6,00	8,00	8,00	7,32	1,14
16_11_2022	9,00	10,00	9,00	10,00	7,00	9,00	10,00	11,00	9,00	10,00	9,40	1,07
23_11_2022	9,00	10,00	12,00	14,00	10,00	9,00	10,00	11,00	11,00	11,00	10,70	1,49
28_11_2022	10,00	12,00	14,00	17,00	11,00	10,00	12,00	13,00	13,00	16,00	12,80	2,35
5_12_2022	15,00	13,00	16,00	17,00	13,00	12,00	14,00	16,00	17,00	16,00	14,90	1,79
12_12_2022	18,00	20,00	18,00	23,00	17,00	12,00	15,00	24,00	22,00	21,00	19,00	3,74
19_12_2022	22,00	23,00	21,00	27,00	21,00	17,00	21,00	30,00	28,00	25,00	23,50	3,95
26_12_2022	28,00	28,00	23,00	31,00	26,00	24,00	27,00	34,00	28,00	32,00	28,10	3,45
3_01_2023	40,00	35,00	30,00	41,00	36,00	36,00	38,00	46,00	44,00	41,00	38,70	4,69
10_01_2023	48,00	40,00	54,00	51,00	46,00	46,00	47,00	54,00	55,00	53,00	49,40	4,81
16_01_2023	57,00	59,00	45,00	50,00	50,00	51,00	51,00	69,00	63,00	60,00	55,50	7,34
24_01_2023	61,00	70,00	51,00	68,00	55,00	58,00	58,00	73,00	71,00	65,00	63,00	7,48
6_02_2023	80,00	75,00	60,00	71,00	70,00	74,00	78,00	79,00	80,00	79,00	74,60	6,29
13_02_2023	85,00	86,00	73,00	87,00	82,00	81,00	85,00	90,00	90,00	82,00	84,10	5,00
20_02_2023	88,00	95,00	79,00	90,00	87,00	88,00	88,00	95,00	79,00	78,00	86,70	6,22
27_02_2023	92,00	95,00	83,00	88,00	83,00	84,00	91,00	85,00	92,00	85,00	87,80	4,39
7_03_2023	87,00	97,00	96,00	95,00	90,00	88,00	92,00	91,00	91,00	88,00	91,50	3,50
13_03_2023	90,00	89,00	82,00	96,00	89,00	88,00	93,00	92,00	93,00	87,00	89,90	3,90
20-03_2023	93,00	95,00	86,00	97,00	88,00	90,00	88,00	89,00	93,00	86,00	90,50	3,81
27_03_2023	90,00	96,00	89,00	81,00	91,00	90,00	89,00	90,00	90,00	87,00	89,30	3,71
3_04_2023	89,00	94,00	89,00	100,00	96,00	95,00	91,00	91,00	93,00	82,00	92,00	4,88
11_04_2023	90,00	95,00	88,00	101,00	93,00	96,00	90,00	90,00	91,00	87,00	92,10	4,23
17_04_2023	90,00	96,00	89,00	99,00	93,00	96,00	86,00	92,00	86,00	80,00	90,70	5,72

10 kg/m²

Date	SP010_1.1	SP010_1.2	SP10_1.3	SP10_1.4	SP10_1.6	SP10_2.4	SP10_2.6	SP10_3.1	SP10_3.2	SP10_3.3	SP10_3.4	SP10_3.5	SP10_3.6	Moyenne	Ecart-type
10.11.2022	7,00	6,00	6,00	5,50	6,50	6,00	7,00	6,00	8,50	6,50	9,00	6,00	6,50	6,55	1,03
16.11.2022	10,00	9,00	10,00	8,00	11,00	9,00	11,00	9,00	11,00	6,50	11,07	10,00	11,00	9,58	1,47
23.11.2022	10,00	9,00	10,00	8,00	12,00	10,00	13,00	9,00	11,00	11,00	10,00	10,00	11,00	10,23	1,36
28.11.2022	15,00	12,00	13,00	13,00	16,00	15,00	18,00	9,00	16,00	16,00	14,00	14,00	14,00	14,33	2,24
5.12.2022	15,00	14,00	15,00	16,00	20,00	17,00	19,00	15,00	19,00	16,00	15,00	17,00	17,00	16,54	1,85
12.12.2022	20,00	17,00	15,00	20,00	24,00	17,00	25,00	15,00	24,00	18,00	18,00	18,00	23,00	19,54	3,45
19.12.2022	25,00	24,00	22,00	26,00	28,00	22,00	30,00	18,00	30,00	26,00	28,00	21,00	32,00	25,54	4,07
26.12.2022	32,00	25,00	29,00	32,00	31,00	29,00	36,00	18,00	42,00	34,00	44,00	25,00	37,00	29,69	5,07
3.01.2023	42,00	38,00	42,00	48,00	49,00	40,00	49,00	33,00	42,00	45,00	42,00	36,00	46,00	42,46	4,94
10.01.2023	52,00	50,00	50,00	56,00	58,00	58,00	68,00	45,00	58,00	55,00	53,00	42,00	52,00	52,08	5,06
16.01.2023	61,00	51,00	56,00	56,00	68,00	55,00	61,00	49,00	70,00	60,00	58,00	48,00	66,00	58,38	6,92
24.01.2023	69,00	57,00	62,00	64,00	71,00	60,00	61,00	61,00	78,00	72,00	67,00	58,00	70,00	65,38	6,31
6.02.2023	76,00	76,00	78,00	80,00	82,00	74,00	83,00	69,00	81,00	80,00	77,77	72,00	81,00	77,77	4,17
13.02.2023	88,00	83,00	84,00	79,00	90,00	83,00	90,00	88,00	83,00	88,00	85,00	82,00	82,00	82,92	4,23
20.02.2023	89,00	78,00	83,00	86,00	94,00	86,00	97,00	95,00	100,00	92,00	94,00	94,00	88,54	4,99	
27.02.2023	84,00	88,00	89,00	89,00	94,00	93,00	95,00	85,00	95,00	84,00	90,00	82,00	97,00	90,00	5,52
7.03.2023	92,00	90,00	90,00	89,00	94,00	89,00	90,00	93,00	95,00	88,00	90,00	83,00	94,00	90,54	3,18
13.03.2023	89,00	91,00	90,00	87,00	92,00	90,00	92,00	93,00	96,00	90,00	90,00	86,00	94,00	90,77	2,76
20.03.2023	89,00	90,00	90,00	86,00	92,00	90,00	94,00	90,00	100,00	90,00	85,00	85,00	97,00	90,85	4,40
27.03.2023	89,00	88,00	92,00	87,00	96,00	89,00	93,00	90,00	97,00	89,00	89,00	86,00	92,00	90,69	3,47
3.04.2023	90,00	89,00	90,00	86,00	93,00	83,00	95,00	90,00	101,00	89,00	89,00	85,00	96,00	89,69	4,50
11.04.2023	85,00	94,00	92,00	87,00	93,00	89,00	91,00	91,00	102,00	97,00	92,00	85,00	96,00	92,15	4,90
17.04.2023	89,00	91,00	90,00	86,00	93,00	91,00	95,00	92,00	100,00	92,00	92,00	88,00	85,00	91,08	3,86

20 kg/m²

Date	SP20_1.2	SP20_1.3	SP20_1.5	SP20_1.6	SP20_2.2	SP20_2.1	SP20_2.3	SP20_2.4	SP20_2.5	SP20_2.6	SP20_3.1	SP20_3.2	SP20_3.3	SP20_3.5	SP20_3.6	Moyenne	Ecart-type
10.11.2022	10,00	9,00	9,00	9,00	10,00	8,50	8,00	8,50	7,50	10,50	5,00	5,50	8,00	7,00	8,00	8,23	1,55
16.11.2022	12,00	11,00	10,00	11,00	12,00	10,00	12,00	12,00	10,00	11,00	6,00	6,00	11,00	11,00	12,00	10,27	2,02
23.11.2022	11,00	12,00	12,00	12,00	12,00	10,00	16,00	12,00	16,00	12,00	12,00	10,00	11,00	10,00	13,00	10,93	1,16
28.11.2022	16,00	16,00	14,00	13,00	16,00	15,00	16,00	16,00	16,00	12,00	12,00	12,00	11,00	10,00	17,00	13,87	2,26
5.12.2022	17,00	18,00	15,00	15,00	16,00	15,00	16,00	14,00	16,00	12,00	14,00	15,00	16,00	13,00	17,00	15,27	1,58
12.12.2022	22,00	22,00	21,00	19,00	22,00	21,00	21,00	21,00	20,00	18,00	20,00	17,00	19,00	18,00	23,00	20,27	1,75
19.12.2022	28,00	30,00	28,00	26,00	28,00	28,00	25,00	27,00	28,00	23,00	27,00	25,00	28,00	28,00	28,00	26,47	2,33
26.12.2022	29,00	34,00	35,00	36,00	29,00	35,00	34,00	35,00	32,00	28,00	36,00	26,00	25,00	28,00	36,00	31,87	3,94
3.01.2023	43,00	45,00	43,00	43,00	43,00	45,00	45,00	47,00	47,00	44,00	37,00	33,00	38,00	37,00	46,00	42,40	5,19
10.01.2023	52,00	55,00	54,00	55,00	56,00	50,00	55,00	57,00	57,00	42,00	46,00	46,00	57,00	57,00	62,00	57,20	5,21
16.01.2023	60,00	62,00	61,00	61,00	65,00	65,00	68,00	60,00	67,00	51,00	52,00	48,00	65,00	62,00	70,00	63,20	7,11
24.01.2023	66,00	71,00	72,00	78,00	69,00	75,00	80,00	79,00	79,00	61,00	61,00	55,00	72,00	72,00	76,00	76,87	5,28
6.02.2023	77,00	81,00	78,00	81,00	80,00	83,00	85,00	83,00	81,00	77,00	83,00	75,00	83,00	77,00	89,00	82,00	6,07
13.02.2023	84,00	89,00	92,00	80,00	93,00	86,00	86,00	86,00	79,00	77,00	79,00	82,00	84,00	93,00	96,53	5,45	
20.02.2023	87,00	89,00	92,00	91,00	94,00	91,00	92,00	89,00	92,00	90,00	94,00	82,00	87,00	95,00	90,27	6,05	
27.02.2023	93,00	75,00	94,00	90,00	88,00	92,00	89,00	92,00	92,00	84,00	92,00	73,00	93,00	85,00	98,27	9,46	
7.03.2023	90,00	86,00	86,00	95,00	94,00	100,00	94,00	94,00	90,00	90,00	94,00	87,00	93,00	94,00	102,00	92,40	6,19
13.03.2023	91,00	90,00	95,00	94,00	92,00	100,00	92,00	89,00	90,00	86,00	91,00	87,00	86,00	94,00	94,00	90,60	4,14
20.03.2023	97,00	92,00	88,00	88,00	91,00	98,00	89,00	89,00	83,00	86,00	92,00	87,00	87,00	93,00	87,00	89,87	4,05
27.03.2023	93,00	89,00	87,00	88,00	96,00	96,00	91,00	89,00	85,00	93,00	93,00	86,00	91,00	95,00	90,13	3,52	
3.04.2023	93,00	89,00	87,00	94,00	91,00	98,00	92,00	87,00	90,00	88,00	93,00	88,00	93,00	86,00	90,40	3,50	
11.04.2023	91,00	81,00	94,00	93,00	90,00	99,00	92,00	89,00	90,00	85,00	93,00	88,00	93,00	86,00	91,93	4,27	

40 kg/m²

Date	SP40_1.1	SP40_1.2	SP40_1.3	SP40_1.4	SP40_1.5	SP40_1.6	SP40_2.1	SP40_2.2	SP40_2.3	SP40_2.4	SP40_2.5	SP40_3.1	SP40_3.2	SP40_3.3	SP40_3.4	SP40_3.5	SP40_3.6	Moyenne	Ecart-type
10.11.2022	7,50	6,50	10,50	10,00	9,00	8,00	6,00	6,50	6,00	8,00	6,00	5,00	5,00	7,00	6,00	9,00	7,00	7,24	1,64
16.11.2022	8,00	7,00	11,00	11,00	10,00	9,00	6,00	6,50	8,00	9,00	6,00	6,00	7,00	7,00	8,00	9,00	9,00	7,78	1,78
23.11.2022	9,00	9,00	13,00	12,00	13,00	10,00	10,00	8,50	8,00	9,00	9,00	7,00	10,00	12,00	10,00	9,00	10,00	9,79	1,76
28.11.2022	9,00	14,00	13,00	12,00	14,00	10,00	12,00	12,00	11,00	12,00	12,00	10,00	12,00	14,00	10,00	13,00	11,00	11,82	1,51
5.12.2022	9,00	15,00	15,00	12,00	16,00	11,00	12,00	18,00	10,00	13,00	14,00	11,00	14,00	14,00	13,00	15,00	13,00	11,82	1,51
12.12.2022	9,00	20,00	23,00	15,00	20,00	11,00	12,00	18,00	10,00	17,00	19,00	18,00	20,00	21,00	15,00	22,00	20,00	17,71	4,25
19.12.2022	18,00	27,00	28,00	27,00	28,00	21,00	25,00	26,00	13,00	22,00	27,00	26,00	30,00	23,00	21,00	28,00	27,00	24,53	4,46
26.12.2022	23,00	30,00	32,00	32,00	34,00	23,00	33,00	28,00	18,00	22,00	27,00	31,00	33,00	36,00	30,00	32,00	30,00	29,12	4,46
3.01.2023	35,00	48,00	46,00	46,00	43,00	37,00	50,00	42,00	29,00	43,00	43,00	41,00	49,00	46,00	43,00	45,00	42,88	5,25	4,74
10.01.2023	41,00	58,00	55,00	61,00	59,00	45,00	52,00	52,00	43,00	50,00	50,00	50,00	59,00	50,00	55,00	55,00	52,00	51,76	6,27
16.01.2023	49,00	58,00	64,00	59,00	59,00	58,00	60,00	57,00	43,00	56,00	61,00	57,00	66,00	63,00	57,00	61,00	61,00	57,47	5,76
24.01.2023	58,00	66,00	64,00	64,00	67,00	58,00	62,00	64,00	51,00	58,00	62,00	65,00	66,00	69,00	67,00	72,00	72,00	63,88	5,34
6.02.2023	65,00	77,00	76,00	79,00	79,00	74,00	82,00	76,00	65,00	79,00	82,00	80,00	83,00	84,00	78,00	80,00	80,41	5,80	5,25
13.02.2023	76,00	84,00	88,00	86,00	83,00	77,00	86,00	82,00	76,00	83,00	82,00	82,00	88,00	80,00	81,00	82,00	86,24	4,74	4,74
20.02.2023	85,00	85,00	91,00	86,00	85,00	85,00	88,00	91,00	78,00	93,00	92,00	88,00	92,00	92,00	81,00	92,00	89,18	4,75	4,75
27.02.2023	88,00	89,00	86,00	89,00	96,00	96,00	92,00	91,00	83,00	89,00	92,00	88,00	90,00	95,00	83,00	92,00	89,55	4,81	4,81
7.03.2023	90,00	87,00	92,00	93,00	96,00	78,00	94,00	91,00	78,00	83,00	89,00	85,00	89,00	90,00	83,00	90,00	89,00	89,35	4,81
13.03.2023	88,00	89,00	92,00	94,00	90,00	90,00	95,00	88,00	85,00	92,00	86,00	91,00	90,00	94,00	83,00	92,00	89,00	89,12	3,62
20.03.2023	87,00	88,00	92,00	92,00	92,00	88,00	97,00	90,00	88,00	95,00	90,00	89,00	91,00	94,00	83,00	92,00	83,00	90,12	3,62
27.03.2023	88,00	89,00	92,00	92,00	95,00	88,00	97,00	90,00	87,00	95,00	91,00	91,00	85,00	97,00	88,00	84,00	84,00	89,06	3,36
3.04.2023	85,00	86,00	92,00	87,00	96,00	89,00	97,00	91,00	82,00	89,00	98,00	91,00	90,00	85,00	86,00	89,00	85,00	89,06	3,31
11.04.2023	85,00	89,00	92,00	87,00	96,00	89,00	97,00	91,00	84,00	93,00	90,00	90,00	92,00	87,00	85,00	89,00	81,00	88,41	4,09
17.04.2023	89,00	87,00	93,00	85,00	94,00	79,00	94,00	90,00	86,00	90,00	90,00	90,00	92,00	88,00	85,00	84,00	81,00	88,12	4,36

Tableau A-6 : Données hebdomadaires, moyenne et écart type de la hauteur des plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻² de téphra au stade tallage au cours de l'expérience

0,5 kg/m2																				
Date	ST0_5_1.1	ST0_5_1.2	ST0_5_1.3	ST0_5_1.4	ST0_5_1.5	ST0_5_1.6	ST0_5_2.1	ST0_5_2.2	ST0_5_2.3	ST0_5_2.4	ST0_5_2.5	ST0_5_2.6	ST0_5_3.1	ST0_5_3.2	ST0_5_3.3	ST0_5_3.4	ST0_5_3.5	ST0_5_3.6	Moyenne	Ecart-type
19_12_2022	30,00	21,00	24,00	37,00	30,00	28,00	25,00	25,00	26,00	34,00	25,00	26,00	29,00	25,00	21,00	33,00	24,00	33,00	27,56	4,51
26_12_2022	34,00	24,00	37,00	39,00	35,00	33,00	29,00	33,00	35,00	40,00	34,00	35,00	37,00	30,00	27,00	38,00	29,00	38,00	33,72	4,40
3_01_2023	46,00	26,00	44,00	53,00	45,00	44,00	43,00	43,00	47,00	51,00	46,00	47,00	49,00	37,00	39,00	52,00	39,00	48,00	44,39	6,34
10_01_2023	55,00	39,00	60,00	61,00	60,00	53,00	53,00	53,00	58,00	59,00	57,00	56,00	53,00	48,00	48,00	58,00	57,00	59,00	54,83	5,50
16_01_2023	66,00	43,00	66,00	67,00	64,00	61,00	57,00	64,00	70,00	72,00	62,00	61,00	68,00	57,00	53,00	63,00	54,00	70,00	62,11	7,23
24_01_2023	72,00	45,00	75,00	70,00	76,00	70,00	61,00	71,00	76,00	77,00	74,00	67,00	74,00	63,00	58,00	69,00	61,00	77,00	68,67	8,37
6_02_2023	78,00	57,00	79,00	86,00	84,00	80,00	79,00	79,00	81,00	80,00	78,00	81,00	78,00	64,00	80,00	82,00	73,00	80,00	77,72	6,92
13_02_2023	85,00	75,00	89,00	84,00	79,00	76,00	84,00	74,00	87,00	81,00	89,00	85,00	86,00	80,00	83,00	80,00	74,00	81,00	81,78	4,83
20_02_2023	83,00	76,00	88,00	85,00	87,00	93,00	88,00	88,00	93,00	82,00	88,00	87,00	84,00	80,00	86,00	85,00	86,00	79,00	85,44	4,38
27_02_2023	90,00	82,00	92,00	92,00	94,00	98,00	91,00	93,00	93,00	93,00	92,00	92,00	89,00	87,00	86,00	84,00	89,00	86,00	90,17	3,96
7_03_2023	88,00	87,00	97,00	94,00	90,00	94,00	80,00	91,00	93,00	83,00	88,00	93,00	90,00	86,00	92,00	84,00	87,00	87,00	89,11	4,38
13_03_2023	88,00	88,00	94,00	93,00	90,00	93,00	93,00	93,00	95,00	86,00	90,00	86,00	86,00	85,00	87,00	86,00	87,00	90,00	89,44	3,31
20_03_2023	84,00	88,00	96,00	99,00	91,00	99,00	90,00	96,00	99,00	89,00	92,00	91,00	90,00	88,00	90,00	90,00	92,00	93,00	92,06	4,22
27_03_2023	85,00	85,00	92,00	96,00	94,00	95,00	90,00	84,00	98,00	86,00	92,00	93,00	88,00	86,00	88,00	86,00	88,00	91,00	89,83	4,23
3_04_2023	83,00	86,00	93,00	96,00	96,00	99,00	90,00	86,00	99,00	83,00	90,00	91,00	90,00	86,00	90,00	89,00	89,00	94,00	90,56	4,87
11_04_2023	84,00	86,00	95,00	96,00	98,00	99,00	90,00	86,00	97,00	82,00	94,00	90,00	90,00	81,00	92,00	86,00	90,00	87,00	90,17	5,49
17_04_2023	89,00	86,00	95,00	97,00	86,00	99,00	90,00	86,00	98,00	83,00	94,00	91,00	90,00	81,00	92,00	85,00	90,00	87,00	89,94	5,16
5 kg/m2																				
Date	ST5_1.1	ST5_1.2	ST5_1.5	ST5_2.1	ST5_2.2	ST5_2.3	ST5_2.4	ST5_2.5	ST5_2.6	ST5_3.1	ST5_3.2	ST5_3.3	ST5_3.4	ST5_3.5	ST5_3.6	Moyenne	Ecart-type			
19_12_2022	32,00	25,00	23,00	33,00	32,00	33,00	30,00	34,00	27,00	19,00	29,00	28,00	33,00	25,00	28,00	28,73	4,35			
26_12_2022	40,00	27,00	32,00	37,00	37,00	35,00	37,00	39,00	35,00	21,00	36,00	33,00	38,00	30,00	33,00	34,00	5,00			
3_01_2023	52,00	38,00	37,00	55,00	47,00	44,00	51,00	54,00	49,00	38,00	48,00	39,00	49,00	43,00	50,00	46,27	6,06			
10_01_2023	61,00	46,00	46,00	64,00	57,00	53,00	61,00	59,00	38,00	60,00	49,00	61,00	52,00	51,00	54,33	7,31				
16_01_2023	61,00	54,00	51,00	61,00	65,00	61,00	61,00	63,00	59,00	53,00	62,00	57,00	70,00	57,00	61,00	59,73	4,83			
24_01_2023	71,00	70,00	62,00	74,00	75,00	65,00	68,00	69,00	69,00	56,00	71,00	65,00	76,00	66,00	68,00	68,33	5,16			
6_02_2023	85,00	79,00	78,00	79,00	81,00	80,00	81,00	82,00	81,00	71,00	80,00	83,00	80,00	78,00	83,00	80,07	3,17			
13_02_2023	92,00	83,00	79,00	85,00	88,00	83,00	85,00	90,00	87,00	73,00	84,00	82,00	86,00	84,00	81,00	84,13	4,56			
20_02_2023	90,00	87,00	89,00	88,00	79,00	84,00	83,00	90,00	84,00	81,00	77,00	83,00	92,00	86,00	86,00	85,27	4,27			
27_02_2023	97,00	84,00	85,00	90,00	86,00	87,00	84,00	90,00	87,00	82,00	87,00	89,00	91,00	90,00	87,00	87,73	3,65			
7_03_2023	89,00	85,00	86,00	89,00	86,00	86,00	83,00	88,00	86,00	84,00	88,00	94,00	92,00	90,00	87,00	87,53	2,95			
13_03_2023	96,00	87,00	86,00	89,00	86,00	87,00	88,00	85,00	87,00	75,00	88,00	95,00	95,00	90,00	89,00	88,20	5,05			
20_03_2023	102,00	95,00	86,00	89,00	94,00	91,00	90,00	94,00	96,00	81,00	89,00	92,00	89,00	90,00	87,00	91,00	4,90			
27_03_2023	96,00	92,00	90,00	92,00	87,00	90,00	89,00	93,00	96,00	86,00	85,00	95,00	99,00	90,00	95,00	91,67	4,05			
3_04_2023	98,00	86,00	86,00	91,00	87,00	92,00	89,00	92,00	96,00	86,00	90,00	90,00	99,00	89,00	88,00	90,60	4,21			
11_04_2023	95,00	97,00	87,00	92,00	90,00	93,00	86,00	93,00	89,00	99,00	89,00	94,00	100,00	92,00	81,00	91,80	5,05			
17_04_2023	96,00	84,00	84,00	92,00	91,00	92,00	90,00	94,00	90,00	86,00	91,00	91,00	89,00	86,00	82,00	89,20	3,99			
10 kg/m2																				
Date	ST10_1.1	ST10_1.2	ST10_1.3	ST10_1.4	ST10_1.5	ST10_1.6	ST10_2.1	ST10_2.2	ST10_2.3	ST10_2.4	ST10_2.5	ST10_2.6	ST10_3.1	ST10_3.2	ST10_3.3	ST10_3.4	ST10_3.5	ST10_3.6	Moyenne	Ecart-type
19_12_2022	24,00	25,00	32,00	18,00	19,00	28,00	26,00	31,00	25,00	28,00	26,00	24,00	31,00	26,00	32,00	29,00	31,00	30,00	26,94	4,11
26_12_2022	28,00	28,00	37,00	21,00	21,00	30,00	34,00	39,00	32,00	35,00	33,00	25,00	36,00	31,00	32,00	34,00	35,00	38,00	31,61	5,30
3_01_2023	45,00	39,00	49,00	31,00	29,00	44,00	44,00	48,00	43,00	51,00	43,00	33,00	44,00	47,00	45,00	49,00	50,00	49,00	43,50	6,53
10_01_2023	50,00	44,00	59,00	39,00	29,00	54,00	55,00	59,00	54,00	59,00	55,00	44,00	58,00	59,00	50,00	61,00	50,00	56,00	51,94	8,38
16_01_2023	60,00	56,00	66,00	44,00	46,00	53,00	58,00	63,00	55,00	63,00	47,00	47,00	65,00	54,00	68,00	61,00	64,00	67,00	57,61	7,77
24_01_2023	66,00	61,00	74,00	54,00	51,00	70,00	69,00	75,00	69,00	72,00	62,00	54,00	64,00	70,00	66,00	70,00	72,00	69,00	66,00	7,07
6_02_2023	79,00	71,00	78,00	71,00	62,00	78,00	73,00	82,00	76,00	84,00	76,00	70,00	80,00	84,00	82,00	77,00	82,00	77,00	76,78	5,69
13_02_2023	83,00	83,00	88,00	81,00	65,00	84,00	93,00	88,00	84,00	87,00	84,00	76,00	87,00	84,00	82,00	86,00	84,00	90,00	83,83	5,99
20_02_2023	86,00	82,00	89,00	82,00	77,00	89,00	91,00	93,00	77,00	82,00	84,00	76,00	88,00	91,00	91,00	82,00	92,00	90,00	85,67	5,56
27_02_2023	89,00	85,00	93,00	88,00	79,00	93,00	95,00	96,00	93,00	90,00	88,00	84,00	84,00	86,00	98,00	89,00	92,00	94,00	89,78	4,94
7_03_2023	89,00	85,00	87,00	85,00	82,00	91,00	95,00	92,00	88,00	90,00	88,00	85,00	90,00	87,00	95,00	95,00	85,00	89,00	88,78	3,80
13_03_2023	89,00	86,00	93,00	84,00	87,00	92,00	93,00	88,00	89,00	84,00	91,00	87,00	92,00	87,00	97,00	97,00	88,00	91,00	89,72	3,83
27_03_2023	89,00	86,00	92,00	84,00	83,00	92,00	96,00	92,00	93,00	87,00	90,00	87,00	92,00	87,00	98,00	98,00	93,00	90,00	90,50	4,36
3_04_2023	94,00	88,00	92,00	86,00	81,00	92,00	93,00	91,00	93,00	87,0										

Tableau A-7 : Données hebdomadaires, moyenne et écart type de la hauteur des plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻² de téphra au stade d’amorçage au cours de l’expérience

0,5 kg/m2

Date	ST0,5_1.1	ST0,5_1.2	ST0,5_1.3	ST0,5_1.4	ST0,5_1.5	ST0,5_1.6	ST0,5_2.1	ST0,5_2.2	ST0,5_2.3	ST0,5_2.4	ST0,5_2.5	ST0,5_2.6	ST0,5_3.1	ST0,5_3.2	ST0,5_3.3	ST0,5_3.4	ST0,5_3.5	ST0,5_3.6	Moyenne	Ecart-type
7_03_2023	91,00	96,00	89,00	90,00	93,00	96,00	90,00	85,00	90,00	90,00	94,00	97,00	89,00	91,00	90,00	88,00	91,00	96,00	91,44	3,24
13_03_2021	89,00	91,00	87,00	85,00	97,00	89,00	88,00	91,00	95,00	86,00	93,00	92,00	91,00	91,00	92,00	89,00	93,00	91,00	90,56	3,03
20-03_2021	94,00	92,00	91,00	93,00	93,00	96,00	93,00	96,00	94,00	91,00	92,00	95,00	97,00	96,00	96,00	96,00	95,00	99,00	94,39	2,20
27_03_2021	92,00	87,00	91,00	90,00	92,00	89,00	92,00	96,00	93,00	94,00	91,00	99,00	100,00	98,00	91,00	95,00	93,00	100,00	93,50	3,79
3_04_2023	91,00	97,00	97,00	91,00	97,00	95,00	92,00	96,00	94,00	94,00	96,00	98,00	96,00	87,00	90,00	95,00	95,00	100,00	94,50	3,22
11_04_2021	92,00	87,00	92,00	88,00	94,00	96,00	92,00	89,00	89,00	95,00	97,00	100,00	96,00	97,00	97,00	88,00	97,00	99,00	93,61	4,10
17_04_2021	93,00	92,00	81,00	89,00	90,00	93,00	91,00	89,00	91,00	92,00	85,00	99,00	88,00	86,00	83,00	88,00	91,00	99,00	90,00	4,68

5 kg/m2

Date	ST5_1.1	ST5_1.2	ST5_1.3	ST5_1.4	ST5_1.5	ST5_1.6	ST5_2.1	ST5_2.2	ST5_2.3	ST5_2.4	ST5_2.5	ST5_2.6	ST5_3.1	ST5_3.2	ST5_3.3	ST5_3.4	ST5_3.5	ST5_3.6	Moyenne	Ecart-type
7_03_2023	94,00	86,00	85,00	90,00	88,00	89,00	85,00	95,00	91,00	90,00	88,00	91,00	88,00	91,00	91,00	82,00	84,00	89,00	88,72	3,39
13_03_2021	94,00	89,00	91,00	90,00	83,00	89,00	85,00	89,00	88,00	91,00	87,00	92,00	87,00	87,00	90,00	87,00	80,00	89,00	88,22	3,28
20-03_2021	94,00	92,00	93,00	92,00	91,00	94,00	90,00	92,00	100,00	95,00	91,00	96,00	89,00	89,00	93,00	84,00	86,00	92,00	91,83	3,62
27_03_2021	93,00	91,00	92,00	91,00	80,00	94,00	85,00	96,00	98,00	94,00	84,00	94,00	90,00	89,00	91,00	90,00	86,00	94,00	90,67	4,54
3_04_2023	94,00	86,00	87,00	92,00	80,00	89,00	91,00	94,00	92,00	90,00	83,00	86,00	89,00	91,00	93,00	83,00	87,00	90,00	88,72	4,00
11_04_2021	83,00	85,00	91,00	90,00	84,00	90,00	86,00	95,00	90,00	82,00	82,00	91,00	90,00	90,00	92,00	86,00	83,00	77,00	87,06	4,62
17_04_2021	94,00		89,00	89,00	78,00	93,00	87,00	83,00	92,00	83,00	86,00	86,00	91,00	90,00	91,00	84,00	81,00	80,00	86,88	4,79

10 kg/m2

Date	ST10_1.1	ST10_1.2	ST10_1.4	ST10_1.5	ST10_1.6	ST10_2.1	ST10_2.2	ST10_2.3	ST10_2.4	ST10_2.5	ST10_2.6	ST10_3.1	ST10_3.2	ST10_3.3	ST10_3.4	ST10_3.5	ST10_3.6	Moyenne	Ecart-type
7_03_2023	89,00	94,00	98,00	86,00	92,00	94,00	84,00	88,00	93,00	94,00	93,00	89,00	94,00	89,00	84,00	93,00	92,00	90,94	3,90
13_03_2021	81,00	94,00	85,00	86,00	77,00	90,00	87,00	84,00	86,00	83,00	85,00	87,00	90,00	86,00	86,00	88,00	85,76	3,80	
20-03_2021	92,00	99,00	86,00	93,00	79,00	91,00	88,00	93,00	87,00	88,00	93,00	94,00	95,00	97,00	90,00	90,00	96,00	91,24	4,79
27_03_2021	83,00	91,00	100,00	95,00	88,00	92,00	90,00	92,00	94,00	86,00	93,00	92,00	97,00	93,00	89,00	91,00	97,00	91,94	4,16
3_04_2023	87,00	94,00	91,00	94,00	86,00	93,00	91,00	92,00	95,00	92,00	93,00	88,00	97,00	96,00	90,00	93,00	96,00	92,24	3,15
11_04_2021	86,00	92,00	85,00	92,00	86,00	90,00	92,00	94,00	93,00	93,00	94,00	95,00	93,00	86,00	80,00	95,00	97,00	90,76	4,56
17_04_2021	81,00	91,00	98,00	84,00	86,00	80,00	90,00	91,00	94,00	86,00	89,00	92,00	94,00	76,00	87,00	85,00	83,00	87,47	5,71

20 kg/m2

Date	ST20_1.1	ST20_1.2	ST20_1.3	ST20_1.4	ST20_1.5	ST20_1.6	ST20_2.1	ST20_2.2	ST20_2.3	ST20_2.4	ST20_2.5	ST20_2.6	ST20_3.1	ST20_3.2	ST20_3.3	ST20_3.4	ST20_3.5	ST20_3.6	Moyenne	Ecart-type
7_03_2023	93,00	84,00	88,00	83,00	94,00	88,00	90,00	89,00	88,00	85,00	84,00	86,00	94,00	81,00	85,00	82,00	86,00	83,00	86,83	3,99
13_03_2021	95,00	86,00	92,00	89,00	91,00	84,00	94,00	91,00	83,00	82,00	83,00	83,00	94,00	83,00	85,00	78,00	90,00	84,00	87,06	5,00
20-03_2021	96,00	88,00	92,00	89,00	89,00	91,00	96,00	94,00	84,00	88,00	83,00	85,00	97,00	85,00	85,00	86,00	87,00	81,00	88,67	4,77
27_03_2021	86,00	86,00	94,00	96,00	97,00	92,00	94,00	93,00	85,00	88,00	76,00	87,00	87,00	88,00	80,00	89,00	89,00	85,00	88,44	5,38
3_04_2023	90,00	86,00	90,00	97,00	97,00	88,00	90,00	92,00	95,00	93,00	92,00	89,00	100,00	88,00	88,00	88,00	88,00	85,00	90,44	4,82
11_04_2021	95,00	87,00	89,00	96,00	97,00	93,00	93,00	92,00	85,00	91,00	92,00	86,00	99,00	88,00	78,00	86,00	86,00	84,00	89,83	5,34
17_04_2021	92,00	87,00	93,00	94,00	97,00	87,00	88,00	92,00	84,00	92,00	91,00	88,00	79,00	89,00	73,00	85,00	82,00	83,00	87,56	5,89

40 kg/m2

Date	ST40_1.1	ST40_1.2	ST40_1.3	ST40_1.4	ST40_1.5	ST40_1.6	ST40_2.1	ST40_2.2	ST40_2.3	ST40_2.4	ST40_2.5	ST40_2.6	ST40_3.1	ST40_3.2	ST40_3.3	ST40_3.4	ST40_3.5	ST40_3.6	Moyenne	Ecart-type
7_03_2023	88,00	84,00	84,00	88,00	82,00	86,00	92,00	85,00	91,00	93,00	93,00	90,00	90,00	93,00	87,00	85,00	90,00	94,00	88,61	3,70
13_03_2021	85,00	84,00	84,00	84,00	82,00	86,00	90,00	82,00	74,00	93,00	97,00	88,00	84,00	88,00	84,00	83,00	86,00	96,00	86,11	5,42
20-03_2021	79,00	91,00	86,00	85,00	90,00	89,00	93,00	88,00	78,00	92,00	96,00	91,00	84,00	90,00	86,00	86,00	93,00	97,00	88,56	5,15
27_03_2021	87,00	83,00	84,00	84,00	88,00	89,00	93,00	88,00	80,00	90,00	97,00	95,00	77,00	92,00	85,00	88,00	92,00	96,00	88,22	5,46
3_04_2023	89,00	84,00	86,00	87,00	90,00	90,00	97,00	90,00	73,00	92,00	98,00	95,00	84,00	92,00	96,00	88,00	94,00	84,00	89,39	6,03
11_04_2021	86,00	83,00	86,00	85,00	90,00	90,00	91,00	91,00	77,00	94,00	94,00	91,00	81,00	87,00	85,00	90,00	90,00	98,00	88,28	5,06
17_04_2021	85,00	84,00	85,00	87,00	89,00	88,00	90,00	88,00	78,00	92,00	93,00	92,00	80,00	87,00	79,00	86,00	89,00	79,00	86,17	4,66

Tableau A-8 : Données hebdomadaires, moyenne et écart type de la hauteur des plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻² de téphra au stade floraison au cours de l'expérience

0,5 kg/m²

Date	ST0,5_1.1	ST0,5_1.2	ST0,5_1.3	ST0,5_1.4	ST0,5_1.5	ST0,5_1.6	ST0,5_2.1	ST0,5_2.2	ST0,5_2.3	ST0,5_2.4	ST0,5_2.5	ST0,5_2.6	ST0,5_3.1	ST0,5_3.2	ST0,5_3.3	ST0,5_3.4	ST0,5_3.5	ST0,5_3.6	Moyenne	Ecart-type
20-03_2023	94,00	92,00	91,00	102,00	96,00	97,00	93,00	100,00	78,00	98,00	87,00	94,00	77,00	81,00	91,00	94,00	93,00	85,00	91,28	7,13
27_03_2023	95,00	90,00	92,00	100,00	85,00	92,00	92,00	100,00	81,00	102,00	86,00	92,00	77,00	82,00	95,00	82,00	83,00	88,00	89,67	7,19
3_04_2023	91,00	90,00	91,00	100,00	96,00	92,00	92,00	80,00	99,00	90,00	92,00	78,00	81,00	98,00	80,00	92,00	87,00	90,06	6,58	
11_04_2023	91,00	79,00	93,00	99,00	85,00	97,00	78,00	102,00	91,00	97,00	89,00	93,00	75,00	83,00	74,00	80,00	90,00	90,00	88,11	8,40
17_04_2023	89,00	86,00	88,00	100,00	84,00	83,00	83,00	92,00	91,00	89,00	86,00	93,00	77,00	80,00	83,00	93,00	83,00	90,00	87,22	5,55

5 kg/m²

Date	ST5_1.1	ST5_1.2	ST5_1.3	ST5_1.5	ST5_1.6	ST5_2.1	ST5_2.2	ST5_2.3	ST5_2.4	ST5_2.5	ST5_3.1	ST5_3.2	ST5_3.3	ST5_3.4	ST5_3.5	ST5_3.6	Moyenne	Ecart-type
20-03_2023	88,00	86,00	85,00	91,00	89,00	89,00	97,00	107,00	82,00	91,00	90,00	87,00	103,00	97,00	89,00	89,00	91,25	6,61
27_03_2023	82,00	91,00	66,00	88,00	65,00	91,00	97,00	93,00	75,00	97,00	91,00	89,00	86,00	94,00	99,00	94,00	87,38	10,40
3_04_2023	88,00	95,00	66,00	94,00	74,00	95,00	100,00	94,00	82,00	92,00	92,00	93,00	87,00	92,00	98,00	83,00	89,06	8,98
11_04_2023	82,00	98,00	67,00	93,00	72,00	94,00	87,00	87,00	90,00	95,00	87,00	91,00	86,00	92,00	103,00	85,00	88,06	8,99
17_04_2023	85,00	95,00	67,00	82,00	71,00	90,00	86,00	89,00	89,00	101,00	86,00	86,00	83,00	80,00	100,00	77,00	86,67	8,01

10 kg/m²

Date	ST10_1.1	ST10_1.2	ST10_1.3	ST10_1.4	ST10_1.5	ST10_1.6	ST10_2.2	ST10_2.3	ST10_2.6	ST10_3.1	ST10_3.2	ST10_3.3	ST10_3.4	ST10_3.5	ST10_3.6	Moyenne	Ecart-type
20-03_2023	96,00	93,00	99,00	95,00	96,00	102,00	100,00	100,00	98,00	88,00	90,00	94,00	95,00	90,00	94,00	95,33	4,05
27_03_2023	96,00	75,00	81,00	95,00	94,00	95,00	89,00	81,00	86,00	91,00	95,00	93,00	91,00	89,00	87,00	89,20	6,22
3_04_2023	95,00	90,00	95,00	94,00	94,00	94,00	88,00	83,00	86,00	93,00	94,00	90,00	90,00	89,00	85,00	91,00	3,80
11_04_2023	95,00	87,00	96,00	88,00	81,00	96,00	90,00	86,00	86,00	90,00	92,00	83,00	88,00	85,00	91,00	87,80	6,86
17_04_2023	94,00	79,00	85,00	88,00	93,00	95,00	88,00	78,00	86,00	90,00	90,00	83,00	90,00	85,00	83,00	87,13	5,10

20 kg/m²

Date	ST20_1.1	ST20_1.2	ST20_1.3	ST20_1.4	ST20_1.5	ST20_1.6	ST20_2.1	ST20_2.2	ST20_2.3	ST20_2.4	ST20_2.5	ST20_2.6	ST20_3.1	ST20_3.2	ST20_3.3	ST20_3.4	ST20_3.5	ST20_3.6	Moyenne	Ecart-type
20-03_2023	90,00	92,00	92,00	94,00	92,00	92,00	91,00	102,00	96,00	90,00	104,00	100,00	97,00	88,00	99,00	92,00	94,00	98,00	94,61	4,50
27_03_2023	86,00	90,00	92,00	94,00	95,00	91,00	85,00	94,00	87,00	88,00	86,00	89,00	97,00	89,00	99,00	95,00	81,00	84,00	90,11	4,89
3_04_2023	87,00	90,00	91,00	93,00	90,00	90,00	83,00	91,00	87,00	87,00	85,00	83,00	96,00	86,00	94,00	95,00	76,00	83,00	88,24	5,23
11_04_2023	89,00	90,00	90,00	94,00	93,00	93,00	82,00	78,00	89,00	89,00	87,00	78,00	85,00	90,00	95,00	90,00	79,00	84,00	87,50	5,38
17_04_2023	91,00	88,00	90,00	95,00	90,00	81,00	77,00	74,00	81,00	81,00	81,00	78,00	88,00	87,00	99,00	99,00	78,00	81,00	85,94	7,50

40 kg/m²

Date	ST40_1.1	ST40_1.2	ST40_1.3	ST40_1.4	ST40_1.5	ST40_1.6	ST40_2.1	ST40_2.2	ST40_2.3	ST40_2.4	ST40_2.5	ST40_2.6	ST40_3.1	ST40_3.2	ST40_3.3	ST40_3.4	ST40_3.5	ST40_3.6	Moyenne	Ecart-type
20-03_2023	99,00	94,00	99,00	91,00	93,00	87,00	96,00	101,00	96,00	93,00	95,00	93,00	94,00	102,00	94,00	91,00	100,00	94,00	95,11	3,88
27_03_2023	93,00	82,00	97,00	82,00	79,00	87,00	85,00	99,00	93,00	90,00	94,00	79,00	93,00	85,00	77,00	93,00	75,00	77,00	86,67	7,57
3_04_2023	93,00	84,00	98,00	89,00	74,00	87,00 ?		99,00	94,00	96,00	95,00	82,00	93,00	84,00	75,00	93,00	83,00	76,00	87,94	8,10
11_04_2023	93,00	83,00	100,00	86,00	75,00	65,00	89,00	93,00	90,00	95,00	95,00	82,00	90,00	83,00	73,00	90,00	86,00	76,00	85,24	8,97
17_04_2023	91,00	77,00	99,00	83,00	72,00	67,00	65,00	97,00	91,00	88,00	85,00	80,00	79,00	83,00	75,00	85,00	84,00	75,00	82,00	9,35

Tableau A-9 : Données hebdomadaires, moyenne et écart type du nombre de feuilles pour les différentes plantes témoins au cours de l'expérience.

Date	TIR29 1.1	TIR29 1.4	TIR29 1.6	TIR29 2.1	TIR29 2.2	TIR29 2.3	TIR29 2.4	TIR29 2.5	TIR29 2.6	TIR29 3.1
10_11_2022	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1
16_11_2022	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3
23_11_2022	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
28_11_2022	4	3	4	4	4	4	4	4	4	3
5_12_2022	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
12_12_2022	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
19_12_2022	7	8	8	7	9	9	7	7	9	7
26_12_2022	8	8	8	8	10	12	8	8	12	9
3_01_2023	9	10	10	10	12	14	10	10	14	12
10_01_2023	10	11	12	12	15	14	13	14	15	15
16_01_2023	12	11	14	12	12	14	14	15	17	16
24_01_2023	12	13	15	14	14	17	18	18	21	16
6_02_2023	14	13	20	17	20	20	23	18	27	21
13_02_2023	12	13	25	21	19	24	22	19	29	20
20_02_2023	15	18	24	24	23	31	24	22	30	22
27_02_2023	16	17	25	27	27	27	26	26	33	26

Date	TIR29 3.2	TIR29 3.3	TIR29 3.4	TIR29 3.5	TIR29 3.6	TIR29 4.1	TIR29 4.2	TIR29 4.3	TIR29 4.4	TIR29 4.5
10_11_2022	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
16_11_2022	3	2	2	3	3	3	2	2	2	3
23_11_2022	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
28_11_2022	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4
5_12_2022	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5
12_12_2022	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5
19_12_2022	7	7	7	7	7	7	8	10	7	11
26_12_2022	8	14	11	9	11	9	9	11	8	11
3_01_2023	12	15	11	12	15	9	12	14	8	14
10_01_2023	12	17	15	13	15	10	13	15	10	12
16_01_2023	15	20	15	13	15	12	18	18	10	15
24_01_2023	17	21	17	16	16	13	15	20	11	13
6_02_2023	17	30	22	26	24	15	18	22	16	18
13_02_2023	19	29	23	23	27	14	21	27	15	17
20_02_2023	21	34	29	27	37	18	27	36	15	25
27_02_2023	33	35	28	28	35	21	24	31	18	27

Date	TIR29 4.6	TIR29 5.1	TIR29 5.2	TIR29 5.3	TIR29 5.4	TIR29 5.5	TIR29 5.6	TIR29 6.2	TIR29 6.3	Moyenne	Ecart-type
10_11_2022	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0,79	0,41
16_11_2022	3	2	3	2	3	2	3	2	2	2,52	0,51
23_11_2022	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3,00	0,00
28_11_2022	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3,90	0,31
5_12_2022	5	5	5	5	5	4	4	5	5	4,90	0,31
12_12_2022	6	5	5	5	6	5	6	6	6	5,83	0,38
19_12_2022	10	9	7	7	6	7	7	8	10	7,83	1,26
26_12_2022	12	9	7	9	7	10	8	9	11	9,45	1,74
3_01_2023	16	12	10	9	8	11	9	10	12	11,38	2,21
10_01_2023	16	14	10	11	10	14	10	10	13	12,79	2,13
16_01_2023	17	16	13	14	11	14	10	10	15	14,07	2,56
24_01_2023	23	16	13	18	14	17	12	10	18	15,79	3,14
6_02_2023	29	20	15	14	15	17	15	13	23	19,38	4,72
13_02_2023	31	18	18	18	14	17	14	15	22	20,21	5,19
20_02_2023	31	20	19	22	16	22	16	17	23	23,72	6,18
27_02_2023	39	24	17	23	16	20	13	14	20	24,69	6,74

Tableau A-10 : Données hebdomadaires, moyenne et écart type du nombre de feuilles des plantes ayant reçu 0,5 et 5 kg m⁻² de téphra au stade plantule au cours de l'expérience.

0,5 kg/m²

Date	SPIO,5_1.1	SPIO,5_1.2	SPIO,5_1.3	SPIO,5_1.5	SPIO,5_1.6	SPIO,5_2.2	SPIO,5_2.3	SPIO,5_2.4	SPIO,5_2.5	SPIO,5_2.6
10_11_2022	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1
16_11_2022	2	2	2	2	3	3	2	3	3	2
23_11_2022	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
28_11_2022	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
5_12_2022	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4
12_12_2022	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
19_12_2022	6	6	6	6	6	5	6	6	6	6
26_12_2022	8	7	8	7	7	7	7	7	7	7
3_01_2023	8	8	9	8	9	9	9	9	8	8
10_01_2023	9	10	9	8	10	9	9	10	8	9
16_01_2023	9	10	9	9	10	10	11	13	11	11
24_01_2023	11	13	12	10	13	12	14	14	13	12
6_02_2023	17	17	17	13	18	19	21	20	18	17
13_02_2023	20	20	19	18	21	20	22	23	22	17
20_02_2023	21	21	19	18	24	25	25	25	25	24
27_02_2023	27	27	24	20	28	27	30	31	27	29

0,5 kg/m²

Date	SPIO,5_3.1	SPIO,5_3.2	SPIO,5_3.3	SPIO,5_3.4	SPIO,5_3.5	SPIO,5_3.6	Moyenne	Ecart-type
10_11_2022	0	1	1	1	0	1	0,75	0,45
16_11_2022	2	3	2	3	2	2	2,38	0,50
23_11_2022	2	3	3	3	2	2	2,81	0,40
28_11_2022	3	3	3	3	3	3	3,00	0,00
5_12_2022	3	4	4	4	4	4	3,88	0,34
12_12_2022	4	5	5	6	5	5	5,00	0,37
19_12_2022	5	6	6	7	6	6	5,94	0,44
26_12_2022	6	7	7	8	7	6	7,06	0,57
3_01_2023	7	8	8	9	9	7	8,31	0,70
10_01_2023	9	9	9	11	12	8	9,31	1,08
16_01_2023	10	10	11	16	15	10	10,94	2,05
24_01_2023	12	11	11	23	15	12	13,00	2,97
6_02_2023	16	14	16	23	18	15	17,44	2,53
13_02_2023	19	16	15	26	23	22	20,19	2,86
20_02_2023	23	19	21	30	27	24	23,19	3,19
27_02_2023	26	23	26	33	27	24	26,81	3,17

5 kg/m²

Date	SPI5_1.1	SPI5_1.3	SPI5_1.4	SPI5_1.5	SPI5_2.2	SPI5_2.4	SPI5_3.1	SPI5_3.2	SPI5_3.4	SPI5_3.5	Moyenne	Ecart-type
10_11_2022	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,00	0,00
16_11_2022	2	3	3	3	3	2	2	2	1	2	2,30	0,67
23_11_2022	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3,00	0,00
28_11_2022	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3,00	0,00
5_12_2022	3	3	3	3	4	3	3	3	4	4	3,30	0,48
12_12_2022	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	4,90	0,32
19_12_2022	6	6	6	7	6	6	6	7	7	7	6,40	0,52
26_12_2022	7	8	7	7	7	7	7	7	9	8	7,40	0,70
3_01_2023	9	8	9	9	9	8	8	9	12	12	9,30	1,49
10_01_2023	9	8	9	10	10	9	9	10	13	12	9,90	1,52
16_01_2023	11	12	11	12	11	10	11	12	16	12	11,80	1,62
24_01_2023	14	15	11	17	14	11	13	15	19	17	14,60	2,59
6_02_2023	20	21	13	18	19	15	20	19	26	24	19,50	3,81
13_02_2023	23	28	14	22	24	19	20	22	28	26	22,60	4,30
20_02_2023	30	27	16	27	28	21	26	30	29	30	26,40	4,55
27_02_2023	34	42	23	27	34	23	26	33	30	30	30,20	5,85

Tableau A-11 : Données hebdomadaires, moyenne et écart type du nombre de feuilles des plantes ayant reçu 10, 20 et 40 kg m⁻² de téphra au stade plantule au cours de l'expérience.

10 kg/m ²																			
Date	SPHO1_1	SPHO_1.2	SPHO_1.3	SPHO_1.4	SPHO_1.6	SPHO_2.4	SPHO_2.6	SPHO_3.1	SPHO_3.2	SPHO_3.3	SPHO_3.4	SPHO_3.5	SPHO_3.6	Moyenne	Ecart-type				
10.11.2022	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0.69	0.48				
16.11.2022	2	2	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2.08	0.49				
23.11.2022	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3.00	0.00				
28.11.2022	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3.00	0.00				
5.12.2022	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3.77	0.60				
12.12.2022	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	4.77	0.44				
19.12.2022	6	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6.00	0.41				
26.12.2022	8	6	7	7	9	9	6	8	7	7	7	7	8	7.15	0.90				
3.01.2023	9	7	9	9	9	12	8	7	10	8	8	8	9	8.54	1.39				
10.01.2023	9	8	10	10	9	9	10	9	12	9	11	9	11	9.92	1.50				
16.01.2023	13	11	12	12	11	13	12	12	14	12	13	14	14	11.92	1.44				
24.01.2023	13	12	14	14	18	14	13	12	16	15	16	11	15	13.92	2.02				
6.02.2023	18	14	19	22	25	19	17	16	21	20	21	16	24	19.38	3.23				
13.02.2023	20	17	21	23	30	19	21	21	24	22	25	21	26	22.31	3.35				
20.02.2023	25	21	23	34	39	23	25	24	26	29	29	24	24	26.23	5.42				
27.02.2023	29	21	28	32	38	24	32	27	25	29	34	23	29	28.54	4.72				
20 kg/m ²																			
Date	SPHO_1.2	SPHO_1.3	SPHO_1.5	SPHO_1.6	SPHO_2.2	SPHO_2.1	SPHO_2.3	SPHO_2.4	SPHO_2.5	SPHO_2.6	SPHO_3.1	SPHO_3.2	SPHO_3.3	SPHO_3.5	SPHO_3.6	Moyenne	Ecart-type		
10.11.2022	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0.87	0.35		
16.11.2022	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2.07	0.26		
23.11.2022	3	3	2	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	2	3	2.73	0.46		
28.11.2022	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2.93	0.26		
5.12.2022	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3.80	0.41		
12.12.2022	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	4	5	5	5	5	4.73	0.46		
19.12.2022	7	6	7	6	6	6	5	6	6	5	6	6	6	6	6	6.13	0.64		
26.12.2022	8	8	7	8	8	8	6	7	6	7	7	6	7	8	7	7.13	0.83		
3.01.2023	9	11	9	9	8	9	8	9	9	8	8	8	8	8	11	8.80	1.01		
10.01.2023	10	12	9	9	8	11	9	10	9	8	9	9	9	9	11	9.40	1.18		
16.01.2023	12	15	12	12	12	14	10	13	12	12	11	11	10	9	13	11.67	1.72		
24.01.2023	13	16	14	12	15	15	13	13	13	13	13	10	10	11	16	13.27	1.94		
6.02.2023	16	25	19	18	22	18	18	20	16	20	14	16	14	13	23	18.13	3.46		
13.02.2023	18	25	21	18	22	22	22	22	18	20	18	19	16	15	25	19.80	2.88		
20.02.2023	22	33	24	24	25	28	23	32	23	23	23	20	19	18	33	24.67	4.79		
27.02.2023	25	35	32	26	29	29	26	33	28	31	28	22	20	21	39	28.27	5.26		
40 kg/m ²																			
Date	SPHO_1.1	SPHO_1.2	SPHO_1.3	SPHO_1.4	SPHO_1.5	SPHO_1.6	SPHO_2.1	SPHO_2.2	SPHO_2.3	SPHO_2.4	SPHO_2.5	SPHO_3.1	SPHO_3.2	SPHO_3.3	SPHO_3.4	SPHO_3.5	SPHO_3.6	Moyenne	Ecart-type
10.11.2022	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.88	0.33
16.11.2022	2	2	3	1	3	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1.94	0.56
23.11.2022	3	3	3	1	3	3	1	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	2.18	0.64
28.11.2022	2	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	2.35	0.49
5.12.2022	3	4	4	3	3	4	2	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	3.12	0.70
12.12.2022	5	5	5	4	5	4	4	5	4	4	4	4	4	4	4	5	5	4.35	0.61
19.12.2022	6	6	7	7	6	6	6	6	5	4	5	6	6	6	7	6	6	5.71	0.77
26.12.2022	7	6	8	7	7	5	7	7	6	6	7	7	8	8	7	8	8	6.88	0.86
3.01.2023	8	8	8	8	9	9	8	8	7	8	7	8	8	8	8	9	8	8.00	1.07
10.01.2023	9	9	10	10	10	8	10	9	7	9	9	10	9	9	10	9	10	9.18	1.07
16.01.2023	10	12	13	12	13	12	13	13	8	10	10	12	12	12	12	14	13	11.71	1.57
24.01.2023	12	13	15	16	13	12	13	15	9	11	14	14	12	14	14	16	15	13.06	2.16
6.02.2023	15	19	17	19	22	12	12	18	11	18	16	17	17	21	18	17	15	17.35	2.78
13.02.2023	20	21	23	24	22	15	24	19	12	21	19	19	20	23	23	21	20	20.59	3.16
20.02.2023	22	25	28	27	22	18	27	22	14	19	19	20	25	25	22	26	26	22.82	4.00
27.02.2023	27	24	29	31	27	19	32	28	15	21	21	24	25	29	28	26	25	25.65	4.27

Tableau A-12 : Données hebdomadaires, moyenne et écart type du nombre de feuilles des plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻² de téphra au stade tallage au cours de l'expérience.

0,5 kg/m2

Date	ST0_5_1.1	ST0_5_1.2	ST0_5_1.3	ST0_5_1.4	ST0_5_1.5	ST0_5_1.6	ST0_5_2.1	ST0_5_2.2	ST0_5_2.3	ST0_5_2.4	ST0_5_2.5	ST0_5_2.6	ST0_5_3.1	ST0_5_3.2	ST0_5_3.3	ST0_5_3.4	ST0_5_3.5	ST0_5_3.6	Moyenne	Ecart-type
19_12_2022	11,00	6,00	7,00	9,00	8,00	7,00	6,00	7,00	7,00	11,00	6,00	7,00	8,00	7,00	6,00	10,00	6,00	8,00	7,61	1,65
26_12_2022	12,00	6,00	10,00	14,00	10,00	7,00	7,00	9,00	9,00	14,00	7,00	8,00	11,00	8,00	7,00	14,00	7,00	10,00	9,44	2,64
3_01_2023	14,00	7,00	11,00	15,00	12,00	8,00	8,00	12,00	11,00	16,00	9,00	9,00	12,00	9,00	8,00	16,00	8,00	12,00	10,94	2,90
10_01_2023	15,00	7,00	12,00	20,00	13,00	9,00	9,00	12,00	10,00	15,00	9,00	10,00	14,00	10,00	9,00	17,00	9,00	13,00	11,83	3,38
16_01_2023	18,00	8,00	15,00	20,00	15,00	11,00	11,00	14,00	13,00	19,00	10,00	13,00	14,00	11,00	11,00	19,00	10,00	15,00	13,72	3,51
24_01_2023	16,00	9,00	17,00	20,00	15,00	14,00	13,00	17,00	17,00	24,00	13,00	13,00	19,00	13,00	12,00	23,00	12,00	20,00	15,94	4,05
6_02_2023	25,00	11,00	26,00	25,00	25,00	19,00	17,00	22,00	22,00	32,00	18,00	21,00	24,00	16,00	18,00	33,00	18,00	27,00	22,17	5,60
13_02_2023	31,00	11,00	29,00	37,00	27,00	21,00	20,00	28,00	25,00	35,00	21,00	23,00	31,00	19,00	21,00	41,00	21,00	30,00	26,17	7,38
20_02_2023	34,00	12,00	33,00	35,00	27,00	24,00	21,00	25,00	24,00	42,00	21,00	26,00	30,00	24,00	24,00	42,00	21,00	32,00	27,61	7,67
27_02_2023	29,00	13,00	34,00	36,00	18,00	27,00	23,00	34,00	29,00	45,00	16,00	25,00	36,00	24,00	27,00	38,00	25,00	37,00	28,67	8,38

5 kg/m2

Date	ST5_1.1	ST5_1.2	ST5_1.5	ST5_2.1	ST5_2.2	ST5_2.3	ST5_2.4	ST5_2.5	ST5_2.6	ST5_3.1	ST5_3.2	ST5_3.3	ST5_3.4	ST5_3.5	ST5_3.6	Moyenne	Ecart-type
19_12_2022	7,00	6,00	7,00	9,00	6,00	7,00	7,00	8,00	6,00	6,00	7,00	7,00	8,00	7,00	7,00	7,00	0,85
26_12_2022	10,00	7,00	8,00	10,00	7,00	8,00	8,00	10,00	6,00	7,00	7,00	8,00	11,00	8,00	8,00	8,20	1,42
3_01_2023	13,00	10,00	9,00	14,00	10,00	12,00	12,00	13,00	8,00	10,00	9,00	9,00	13,00	9,00	9,00	10,67	1,95
10_01_2023	14,00	11,00	10,00	16,00	11,00	12,00	14,00	13,00	10,00	10,00	10,00	10,00	14,00	10,00	11,00	11,73	1,98
16_01_2023	20,00	13,00	11,00	20,00	15,00	16,00	19,00	16,00	13,00	11,00	14,00	11,00	18,00	13,00	13,00	14,87	3,18
24_01_2023	22,00	14,00	15,00	20,00	17,00	18,00	21,00	17,00	15,00	12,00	16,00	12,00	24,00	16,00	18,00	17,13	3,48
6_02_2023	28,00	20,00	19,00	27,00	19,00	22,00	25,00	28,00	20,00	23,00	23,00	19,00	31,00	21,00	21,00	23,07	3,86
13_02_2023	36,00	23,00	20,00	29,00	26,00	24,00	37,00	28,00	20,00	21,00	23,00	23,00	30,00	22,00	23,00	25,47	5,51
20_02_2023	34,00	27,00	23,00	34,00	27,00	27,00	32,00	32,00	22,00	22,00	23,00	22,00	33,00	26,00	24,00	27,20	4,63
27_02_2023	55,00	29,00	27,00	40,00	28,00	33,00	38,00	30,00	26,00	23,00	26,00	27,00	38,00	28,00	26,00	31,60	8,23

10 kg/m2

Date	ST10_1.1	ST10_1.2	ST10_1.3	ST10_1.4	ST10_1.5	ST10_1.6	ST10_2.1	ST10_2.2	ST10_2.3	ST10_2.4	ST10_2.5	ST10_2.6	ST10_3.1	ST10_3.2	ST10_3.3	ST10_3.4	ST10_3.5	ST10_3.6	Moyenne	Ecart-type
19_12_2022	6,00	6,00	7,00	7,00	5,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	5,00	7,00	6,00	7,00	7,00	6,00	7,00	6,22	0,65
26_12_2022	7,00	6,00	8,00	7,00	6,00	8,00	7,00	7,00	6,00	8,00	7,00	7,00	8,00	7,00	8,00	8,00	6,00	8,00	7,17	0,79
3_01_2023	8,00	8,00	8,00	9,00	8,00	9,00	8,00	9,00	8,00	11,00	8,00	8,00	8,00	8,00	9,00	8,00	9,00	9,00	8,50	0,79
10_01_2023	11,00	9,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	9,00	9,00	13,00	11,00	9,00	11,00	9,00	10,00	11,00	9,00	10,00	10,06	1,06
16_01_2023	14,00	10,00	12,00	11,00	10,00	12,00	14,00	12,00	14,00	16,00	12,00	11,00	13,00	14,00	16,00	12,00	13,00	12,00	12,67	1,75
24_01_2023	16,00	13,00	14,00	12,00	10,00	14,00	16,00	12,00	12,00	17,00	14,00	12,00	13,00	15,00	17,00	17,00	14,00	14,00	14,00	2,03
6_02_2023	22,00	17,00	21,00	17,00	13,00	18,00	19,00	19,00	17,00	25,00	21,00	17,00	19,00	21,00	22,00	22,00	21,00	19,00	19,44	2,75
13_02_2023	28,00	20,00	23,00	19,00	18,00	20,00	22,00	23,00	20,00	31,00	22,00	19,00	20,00	22,00	31,00	24,00	21,00	22,00	22,50	3,84
20_02_2023	30,00	22,00	30,00	22,00	18,00	26,00	27,00	23,00	23,00	36,00	23,00	21,00	23,00	23,00	34,00	26,00	25,00	22,00	25,22	4,66
27_02_2023	38,00	26,00	35,00	24,00	18,00	27,00	30,00	28,00	21,00	41,00	26,00	24,00	33,00	28,00	33,00	31,00	29,00	31,00	29,06	5,74

20 kg/m2

Date	ST20_1.1	ST20_1.2	ST20_1.3	ST20_1.4	ST20_1.5	ST20_1.6	ST20_2.1	ST20_2.2	ST20_2.3	ST20_2.4	ST20_2.5	ST20_2.6	ST20_3.1	ST20_3.2	ST20_3.3	ST20_3.4	ST20_3.5	ST20_3.6	Moyenne	Ecart-type
19_12_2022	6,00	6,00	6,00	7,00	6,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	8,00	6,00	9,00	7,00	9,00	8,00	7,00	8,00	7,11	0,96
26_12_2022	6,00	7,00	7,00	8,00	7,00	8,00	7,00	7,00	9,00	8,00	10,00	6,00	9,00	8,00	9,00	10,00	10,00	10,00	8,11	1,37
3_01_2023	8,00	7,00	8,00	10,00	8,00	9,00	7,00	9,00	12,00	10,00	12,00	7,00	11,00	9,00	12,00	10,00	12,00	11,00	9,56	1,82
10_01_2023	8,00	9,00	9,00	13,00	9,00	9,00	9,00	9,00	14,00	11,00	12,00	9,00	11,00	9,00	12,00	10,00	14,00	12,00	10,50	1,92
16_01_2023	10,00	11,00	11,00	16,00	9,00	13,00	13,00	10,00	16,00	12,00	15,00	10,00	14,00	10,00	16,00	13,00	15,00	17,00	12,83	2,57
24_01_2023	12,00	15,00	13,00	16,00	15,00	15,00	11,00	14,00	15,00	12,00	17,00	10,00	15,00	11,00	15,00	14,00	12,00	12,00	13,56	1,98
6_02_2023	17,00	18,00	21,00	25,00	13,00	18,00	18,00	19,00	22,00	21,00	24,00	14,00	22,00	14,00	21,00	20,00	19,00	19,00	19,17	3,29
13_02_2023	20,00	22,00	20,00	27,00	17,00	19,00	18,00	20,00	26,00	23,00	24,00	16,00	25,00	16,00	26,00	18,00	23,00	25,00	21,39	3,63
20_02_2023	21,00	26,00	27,00	28,00	17,00	22,00	20,00	23,00	27,00	24,00	24,00	18,00	27,00	17,00	26,00	23,00	26,00	27,00	23,50	3,63
27_02_2023	26,00	28,00	22,00	32,00	21,00	27,00	21,00	26,00	30,00	25,00	27,00	19,00	27,00	20,00	28,00	28,00	31,00	32,00	26,11	4,06

40 kg/m2

Date	ST40_1.1	ST40_1.2	ST40_1.3	ST40_1.4	ST40_1.5	ST40_1.6	ST40_2.1	ST40_2.2	ST40_2.3	ST40_2.4	ST40_2.5	ST40_2.6	ST40_3.1	ST40_3.2	ST40_3.3	ST40_3.4	ST40_3.5	ST40_3.6	Moyenne	Ecart-type
19_12_2022	7,00	6,00	10,00	9,00	9,00	10,00	8,00	11,00	10,00	10,00	7,00	9,00	9,00	8,00	8,00	5,00	8,00	9,00	8,50	1,54
26_12_2022	7,00	6,00	13,00	10,00	13,00	11,00	9,00	12,00	11,00	10,00	7,00	10,00	12,00	8,00	8,00	6,00	10,00	11,00	9,67	2,25
3_01_2023	8,00	8,00	15,00	12,00	14,00	13,00	12,00	15,00	15,00	13,00	9,00	11,00	15,00	9,00	10,00	7,00	9,00	16,00	11,72	2,93
10_01_2023	16,00	14,00	15,00	15,00	14,00	18,00	15,00	15,00	15,00	16,00	9,00	14,00	16,00	9,00	12,00	7,00	13,00	19,00	14,00	3,09
16_01_2023	12,00	11,00	17,00	15,00	15,00	17,00	15,00	22,00	17,00	18,00	10,00	14,00	19,00	13,00	14,00	8,00	13,00	19,00	14,94	3,52
24_01_2023	12,00	13,00	19,00	15,00	16,00	25,00	21,00	23,00	22,00	21,00	11,00	17,00	22,00	15,00	17,00	11,00	19,00	19,00	17,67	4,26
6_02_2023	18,00	17,00	28,00	21,00	26,00	30,00	26,00	32,00	31,00	24,00	16,00	22,00	28,00	19,00	22,00	15,00	22,00	29,00	23,67	5,36
13_02_2023	21,00	20,00	31,00	19,00	27,00	34,00	29,00	35,00	26,00	28,00	18,00	25,00	30,00	21,00	25,00	16,00	27,00	32,00	25,78	5,62
20_02_2023	24,00	23,00	37,00	25,00	29,00	39,00	27,00	34,00	30,00	37,00	22,00	27,00	35,00	21,00	27,00	20,00	33,00	37,00	29,28	6,19
27_02_2023	27,00	22,00	34,00	27,00	37,00	42,00	35,00	42,00	36,00	37,00	19,00	28,00	36,00	24,00	33,00	20,00	26,00	39,00	31,33	7,34

Tableau A-13 : Données hebdomadaires, moyenne et écart type du nombre de panicules des plantes témoins au cours de l'expérience.

Date	TIR29 1.1	TIR29 1.4	TIR29 1.6	TIR29 2.1	TIR29 2.2	TIR29 2.3	TIR29 2.4	TIR29 2.5	TIR29 2.6	TIR29 3.1
7_03_2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13_03_2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16_03_2023	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
20-03_2023	0	0	0	0	2	2	1	1	2	2
27_03_2023	1	0	3	2	3	4	2	2	5	3
3_04_2023	2	2	3	3	3	5	3	3	5	3
11_04_2023	3	3	4	3	3	6	3	3	5	3
17_04_2023	3	3	6	4	5	6	4	3	5	3

Date	TIR29 3.2	TIR29 3.3	TIR29 3.4	TIR29 3.5	TIR29 3.6	TIR29 4.1	TIR29 4.2	TIR29 4.3	TIR29 4.4	TIR29 4.5
7_03_2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13_03_2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16_03_2023	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0
20-03_2023	0	2	2	1	1	0	2	2	0	0
27_03_2023	2	2	4	4	5	2	3	5	2	2
3_04_2023	3	6	4	4	6	4	4	5	3	4
11_04_2023	3	6	4	4	7	4	4	6	3	4
17_04_2023	3	6	4	5	7	4	5	6	3	4

Date	TIR29 4.6	TIR29 5.1	TIR29 5.2	TIR29 5.3	TIR29 5.4	TIR29 5.5	TIR29 5.6	TIR29 6.2	TIR29 6.3	Moyenne	Ecart-type
7_03_2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
13_03_2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
16_03_2023	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0,34	0,55
20-03_2023	3	1	0	2	0	0	0	0	0	0,90	0,98
27_03_2023	5	2	1	2	2	2	2	1	3	2,62	1,32
3_04_2023	6	4	2	3	2	3	2	2	5	3,59	1,27
11_04_2023	7	5	3	6	2	4	2	3	6	4,10	1,45
17_04_2023	7	5	3	6	3	5	5	3	9	4,66	1,54

Tableau A-14 : Données hebdomadaires, moyenne et écart type du nombre de panicules des plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻² de téphra au stade plantule au cours de l'expérience.

0.5kg/m ²																										
Date	SPD0_5_1.1	SPD0_5_1.2	SPD0_5_1.3	SPD0_5_1.5	SPD0_5_1.6	SPD0_5_2.2	SPD0_5_2.3	SPD0_5_2.4	SPD0_5_2.5	SPD0_5_2.6	SPD0_5_3.1	SPD0_5_3.2	SPD0_5_3.3	SPD0_5_3.4	SPD0_5_3.5	SPD0_5_3.6	Moyenne	Ecart-type								
7_03_2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13_03_2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16_03_2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20-03_2023	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,125	0,9105859	0	0	0	0	0	0	0,5
27_03_2023	1	3	3	3	1	3	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,8125	0,9810708	3	2	4	1	2	3	2,71
3_04_2023	4	4	4	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2,8125	0,9810708	3	3	4	4	4	4	3,75
11_04_2023	4	4	4	5	3	6	6	6	4	5	4	4	4	4	4	4	4	3,75	0,9309493	4	3	4	4	4	4	4,5
17_04_2023	4	4	4	5	4	7	7	7	4	6	4	4	4	4	5	5	4	4,5	1,0954451	4	5	5	4	4	4	5,0625
																		5,0625	1,1236103							

5kg/m ²																											
Date	SPS_1.1	SPS_1.3	SPS_1.4	SPS_1.5	SPS_2.2	SPS_2.4	SPS_3.1	SPS_3.2	SPS_3.4	SPS_3.5	Moyenne	Ecart-type															
7_03_2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00															
13_03_2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00															
16_03_2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00															
20-03_2023	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	1	0,40	0,70														
27_03_2023	4	4	4	3	1	2	3	4	5	6	3,50	1,51															
3_04_2023	6	8	5	3	5	6	4	6	6	6	6,80	1,35															
11_04_2023	6	11	4	6	10	6	5	7	7	7	7,10	2,51															
17_04_2023	6	12	4	6	11	6	5	7	7	7																	

10kg/m ²																											
Date	SPD00_1.1	SPD0_1.2	SPD0_1.3	SPD0_1.4	SPD0_1.6	SPD0_2.4	SPD0_2.6	SPD0_3.1	SPD0_3.2	SPD0_3.3	SPD0_3.4	SPD0_3.5	SPD0_3.6	Moyenne	Ecart-type												
7_03_2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00												
13_03_2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00												
16_03_2023	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,08	0,28												
20-03_2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08	0,87												
27_03_2023	3	3	3	4	5	3	1	3	2	3	4	4	4	3,08	1,19												
3_04_2023	4	4	3	4	4	6	4	4	3	3	4	5	4	4,23	1,54												
11_04_2023	8	3	3	4	5	8	7	9	4	4	6	4	5	5,38	2,02												
17_04_2023	6	3	3	4	5	8	8	11	4	5	6	5	5	5,62	2,26												

20kg/m ²																										
Date	SPD00_1.2	SPD00_1.3	SPD00_1.5	SPD00_1.6	SPD00_2.2	SPD00_2.1	SPD00_2.3	SPD00_2.4	SPD00_2.5	SPD00_2.6	SPD00_3.1	SPD00_3.2	SPD00_3.3	SPD00_3.5	SPD00_3.6	Moyenne	Ecart-type									
7_03_2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00									
13_03_2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00									
16_03_2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00									
20-03_2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00									
27_03_2023	2	4	2	2	2	2	2	2	2	0	1	0	0	0	0	0,00	0,00									
3_04_2023	3	6	4	4	4	5	4	3	3	2	3	3	2	2	3	3,67	1,35									
11_04_2023	4	6	5	5	5	6	6	6	6	5	5	4	2	3	7	4,80	1,32									
17_04_2023	4	6	5	5	5	6	5	7	6	6	5	4	3	3	7	5,13	1,25									

40kg/m ²																											
Date	SPD00_1.1	SPD00_1.2	SPD00_1.3	SPD00_1.4	SPD00_1.5	SPD00_1.6	SPD00_2.1	SPD00_2.2	SPD00_2.3	SPD00_2.4	SPD00_2.5	SPD00_3.1	SPD00_3.2	SPD00_3.3	SPD00_3.4	SPD00_3.5	SPD00_3.6	Moyenne	Ecart-type								
7_03_2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00								
13_03_2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00								
16_03_2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00								
20-03_2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00								
27_03_2023	2	4	2	3	2	2	2	2	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00								
3_04_2023	3	6	4	5	4	6	4	3	3	2	3	3	3	2	2	3	3,67	1,35									
11_04_2023	4	6	5	5	4	5	6	6	6	5	5	4	2	3	7	4,80	1,32										
17_04_2023	4	6	5	5	5	6	5	7	6	6	5	4	3	3	7	5,13	1,25										

Tableau A-15 : Données hebdomadaires, moyenne et écart type du nombre de panicules des plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻² de téphra au stade tallage au cours de l'expérience.

0,5 kg/m2

Date	ST0,5_1.1	ST0,5_1.2	ST0,5_1.3	ST0,5_1.4	ST0,5_1.5	ST0,5_1.6	ST0,5_2.1	ST0,5_2.2	ST0,5_2.3	ST0,5_2.4	ST0,5_2.5	ST0,5_2.6	ST0,5_3.1	ST0,5_3.2	ST0,5_3.3	ST0,5_3.4	ST0,5_3.5	ST0,5_3.6	Moyenne	Ecart-type
7_03_2023	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13_03_2021	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,28	0,67
16_03_2021	1,00		2,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	2,00	3,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	3,00	0,00	3,00	1,12	1,11
20-03_2021	2,00	0,00	3,00	4,00	2,00	2,00	1,00	3,00	2,00	3,00	2,00	1,00	3,00	1,00	2,00	5,00	1,00	6,00	2,39	1,50
27_03_2021	5,00	0,00	5,00	5,00	4,00	4,00	3,00	4,00	4,00	5,00	3,00	4,00	5,00	3,00	3,00	7,00	3,00	6,00	4,06	1,51
3_04_2023	5,00	1,00	5,00	6,00	4,00	4,00	3,00	4,00	4,00	6,00	3,00	4,00	5,00	3,00	4,00	7,00	3,00	6,00	4,28	1,45
11_04_2021	5,00	1,00	6,00	6,00	4,00	4,00	3,00	4,00	4,00	6,00	3,00	4,00	6,00	3,00	4,00	7,00	4,00	6,00	4,44	1,50
17_04_2021	6,00	1,00	6,00	6,00	5,00	5,00	3,00	4,00	4,00	7,00	3,00	4,00	6,00	3,00	4,00	7,00	4,00	6,00	4,67	1,61

5 kg/m2

Date	ST5_1.1	ST5_1.2	ST5_1.5	ST5_2.1	ST5_2.2	ST5_2.3	ST5_2.4	ST5_2.5	ST5_2.6	ST5_3.1	ST5_3.2	ST5_3.3	ST5_3.4	ST5_3.5	ST5_3.6	Moyenne	Ecart-type
7_03_2023	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13_03_2021	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16_03_2021	1,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	1,00	3,00	1,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,00	1,00	0,93	1,10
20-03_2021	4,00	1,00	1,00	5,00	3,00	2,00	3,00	3,00	3,00	0,00	3,00	2,00	5,00	1,00	2,00	2,53	1,46
27_03_2021	8,00	3,00	4,00	5,00	4,00	4,00	4,00	4,00	3,00	3,00	4,00	3,00	5,00	3,00	4,00	4,07	1,28
3_04_2023	8,00	5,00	4,00	5,00	4,00	5,00	4,00	4,00	4,00	3,00	4,00	3,00	6,00	4,00	4,00	4,47	1,25
11_04_2021	8,00	5,00	4,00	7,00	4,00	5,00	4,00	5,00	4,00	3,00	4,00	4,00	6,00	4,00	4,00	4,73	1,33
17_04_2021	8,00	5,00	4,00	7,00	4,00	5,00	4,00	5,00	4,00	3,00	4,00	4,00	6,00	4,00	4,00	4,73	1,33

10 kg/m2

Date	ST10_1.1	ST10_1.2	ST10_1.3	ST10_1.4	ST10_1.5	ST10_1.6	ST10_2.1	ST10_2.2	ST10_2.3	ST10_2.4	ST10_2.5	ST10_2.6	ST10_3.1	ST10_3.2	ST10_3.3	ST10_3.4	ST10_3.5	ST10_3.6	Moyenne	Ecart-type
7_03_2023	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13_03_2021	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16_03_2021	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,24
20-03_2021	2,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00	1,00	3,00	1,00	2,00	1,00	0,00	0,78	0,88
27_03_2021	5,00	3,00	4,00	3,00	2,00	4,00	4,00	3,00	5,00	3,00	2,00	3,00	4,00	6,00	4,00	4,00	4,00	3,72	1,02	1,02
3_04_2023	6,00	4,00	4,00	3,00	3,00	4,00	4,00	4,00	5,00	5,00	4,00	3,00	5,00	4,00	6,00	5,00	4,00	4,00	4,28	0,89
11_04_2021	6,00	4,00	5,00	3,00	3,00	5,00	5,00	4,00	5,00	5,00	5,00	3,00	6,00	5,00	6,00	5,00	4,00	5,00	4,67	0,97
17_04_2021	6,00	4,00	5,00	4,00	3,00	5,00	5,00	4,00	5,00	6,00	5,00	4,00	6,00	5,00	6,00	5,00	4,00	5,00	4,83	0,86

20 kg/m2

Date	ST20_1.1	ST20_1.2	ST20_1.3	ST20_1.4	ST20_1.5	ST20_1.6	ST20_2.1	ST20_2.2	ST20_2.3	ST20_2.4	ST20_2.5	ST20_2.6	ST20_3.1	ST20_3.2	ST20_3.3	ST20_3.4	ST20_3.5	ST20_3.6	Moyenne	Ecart-type
7_03_2023	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13_03_2021	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16_03_2021	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,24
20-03_2021	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	1,00	0,00	0,56	0,86
27_03_2021	3,00	3,00	3,00	4,00	3,00	3,00	2,00	3,00	3,00	0,00	3,00	0,00	3,00	1,00	4,00	2,00	3,00	2,00	2,50	1,15
3_04_2023	4,00	4,00	3,00	5,00	3,00	4,00	4,00	4,00	6,00	4,00	4,00	3,00	5,00	3,00	6,00	4,00	4,00	4,00	4,11	0,90
11_04_2021	4,00	4,00	3,00	6,00	3,00	5,00	4,00	4,00	6,00	5,00	4,00	3,00	5,00	3,00	6,00	5,00	5,00	5,00	4,44	1,04
17_04_2021	4,00	5,00	4,00	6,00	3,00	6,00	4,00	4,00	6,00	5,00	5,00	3,00	6,00	3,00	6,00	5,00	5,00	5,00	4,72	1,07

40 kg/m2

Date	ST40_1.1	ST40_1.2	ST40_1.3	ST40_1.4	ST40_1.5	ST40_1.6	ST40_2.1	ST40_2.2	ST40_2.3	ST40_2.4	ST40_2.5	ST40_2.6	ST40_3.1	ST40_3.2	ST40_3.3	ST40_3.4	ST40_3.5	ST40_3.6	Moyenne	Ecart-type
7_03_2023	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13_03_2021	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,17	0,51
16_03_2021	0,00	1,00	2,00	1,00	0,00	2,00	1,00	1,00	2,00	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,83	0,79
20-03_2021	3,00	2,00	3,00	2,00	1,00	4,00	3,00	3,00	4,00	3,00	1,00	2,00	2,00	1,00	1,00	0,00	2,00	3,00	2,22	1,11
27_03_2021	4,00	3,00	6,00	3,00	4,00	5,00	3,00	6,00	5,00	5,00	3,00	4,00	5,00	4,00	4,00	2,00	4,00	7,00	4,28	1,27
3_04_2023	4,00	3,00	6,00	4,00	5,00	6,00	5,00	6,00	5,00	5,00	3,00	4,00	6,00	4,00	4,00	3,00	5,00	8,00	4,78	1,31
11_04_2021	5,00	3,00	6,00	4,00	6,00	6,00	6,00	6,00	5,00	8,00	3,00	4,00	6,00	6,00	4,00	3,00	5,00	8,00	5,22	1,52
17_04_2021	6,00	3,00	7,00	4,00	6,00	6,00	6,00	7,00	6,00	9,00	3,00	4,00	7,00	6,00	4,00	4,00	5,00	8,00	5,61	1,69

Tableau A-16 : Données hebdomadaires, moyenne et écart type du nombre de panicules des plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻² de téphra au stade d'amorçage au cours de l'expérience.

0,5 kg/m2																				
Date	ST0,5_1.	ST0,5_1.	ST0,5_1.	ST0,5_1.	ST0,5_1.	ST0,5_1.	ST0,5_2.	ST0,5_2.	ST0,5_2.	ST0,5_2.	ST0,5_2.	ST0,5_2.	ST0,5_3.	ST0,5_3.	ST0,5_3.	ST0,5_3.	ST0,5_3.	ST0,5_3.	Moyenne	Ecart-type
7_03_2023	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13_03_202	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,47
16_03_202	0,00	0,00	2,00	0,00	2,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	3,00	0,00	2,00	2,00	3,00	2,00	1,17	1,04
20-03_202	1,00	2,00	3,00	2,00	3,00	3,00	2,00	3,00	4,00	2,00	4,00	3,00	4,00	2,00	3,00	4,00	6,00	4,00	3,06	1,16
27_03_202	3,00	4,00	5,00	3,00	4,00	3,00	3,00	4,00	4,00	3,00	5,00	5,00	4,00	3,00	5,00	4,00	6,00	4,00	4,00	0,91
3_04_2023	4,00	4,00	6,00	3,00	5,00	4,00	3,00	4,00	4,00	3,00	5,00	5,00	4,00	3,00	5,00	5,00	6,00	5,00	4,33	0,97
11_04_202	6,00	4,00	6,00	4,00	5,00	4,00	3,00	4,00	6,00	4,00	5,00	5,00	4,00	4,00	5,00	5,00	6,00	5,00	4,72	0,89
17_04_202	6,00	4,00	8,00	4,00	5,00	4,00	3,00	4,00	6,00	4,00	5,00	5,00	4,00	4,00	5,00	5,00	6,00	5,00	4,83	1,15

5 kg/m2																				
Date	ST5_1.1	ST5_1.2	ST5_1.3	ST5_1.4	ST5_1.5	ST5_1.6	ST5_2.1	ST5_2.2	ST5_2.3	ST5_2.4	ST5_2.5	ST5_2.6	ST5_3.1	ST5_3.2	ST5_3.3	ST5_3.4	ST5_3.5	ST5_3.6	Moyenne	Ecart-type
7_03_2023	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13_03_202	0,00	4,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	3,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,72	1,23
16_03_202	1,00	4,00	5,00	1,00	1,00	2,00	1,00	3,00	3,00	1,00	2,00	4,00	3,00	3,00	3,00	1,00	2,00	2,00	2,33	1,24
20-03_202	4,00	4,00	6,00	3,00	2,00	4,00	3,00	3,00	4,00	4,00	3,00	4,00	3,00	4,00	4,00	2,00	3,00	4,00	3,56	0,92
27_03_202	4,00	4,00	7,00	3,00	3,00	4,00	4,00	3,00	4,00	4,00	3,00	4,00	5,00	4,00	4,00	3,00	5,00	4,00	4,00	0,97
3_04_2023	4,00	5,00	7,00	3,00	3,00	4,00	4,00	4,00	5,00	4,00	3,00	4,00	5,00	5,00	4,00	3,00	5,00	4,00	4,22	1,00
11_04_202	4,00	6,00	7,00	3,00	3,00	4,00	4,00	4,00	5,00	5,00	4,00	4,00	5,00	5,00	4,00	3,00	5,00	5,00	4,44	1,04
17_04_202	4,00	6,00	7,00	3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	5,00	5,00	4,00	4,00	5,00	5,00	4,00	3,00	5,00	5,00	4,50	0,99

10 kg/m2																				
Date	ST10_1.1	ST10_1.2	ST10_1.4	ST10_1.5	ST10_1.6	ST10_2.1	ST10_2.2	ST10_2.3	ST10_2.4	ST10_2.5	ST10_2.6	ST10_3.1	ST10_3.2	ST10_3.3	ST10_3.4	ST10_3.5	ST10_3.6	Moyenne	Ecart-type	
7_03_2023	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13_03_202	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,24	
16_03_202	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	3,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,00	0,65	0,86	
20-03_202	0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	1,00	2,00	5,00	0,00	0,00	3,00	3,00	3,00	2,00	2,00	3,00	2,00	1,65	1,50	
27_03_202	1,00	6,00	3,00	2,00	2,00	3,00	3,00	5,00	3,00	3,00	5,00	4,00	3,00	5,00	3,00	5,00	3,00	3,47	1,33	
3_04_2023	4,00	6,00	4,00	3,00	4,00	4,00	3,00	6,00	3,00	4,00	5,00	5,00	3,00	5,00	3,00	6,00	4,00	4,24	1,09	
11_04_202	4,00	6,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	6,00	3,00	5,00	5,00	5,00	3,00	5,00	3,00	6,00	4,00	4,41	1,00	
17_04_202	4,00	7,00	4,00	5,00	4,00	4,00	4,00	6,00	5,00	5,00	5,00	5,00	3,00	5,00	3,00	6,00	4,00	4,65	1,06	

20 kg/m2																				
Date	ST20_1.1	ST20_1.2	ST20_1.3	ST20_1.4	ST20_1.5	ST20_1.6	ST20_2.1	ST20_2.2	ST20_2.3	ST20_2.4	ST20_2.5	ST20_2.6	ST20_3.1	ST20_3.2	ST20_3.3	ST20_3.4	ST20_3.5	ST20_3.6	Moyenne	Ecart-type
7_03_2023	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13_03_202	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	3,00	2,00	2,00	3,00	1,00	2,00	3,00	0,00	0,00	3,00	0,00	1,00	1,00	1,28	1,18
16_03_202	2,00	2,00	4,00	2,00	2,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	2,00	3,00	2,00	0,00	4,00	2,00	3,00	2,00	2,50	0,92
20-03_202	4,00	2,00	4,00	4,00	3,00	5,00	4,00	4,00	4,00	3,00	2,00	5,00	4,00	2,00	5,00	3,00	4,00	5,00	3,72	1,02
27_03_202	4,00	2,00	5,00	5,00	3,00	5,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	5,00	5,00	3,00	5,00	4,00	4,00	5,00	4,17	0,86
3_04_2023	4,00	4,00	6,00	5,00	3,00	6,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	5,00	5,00	3,00	5,00	6,00	4,00	5,00	4,50	0,92
11_04_202	4,00	4,00	6,00	5,00	3,00	6,00	4,00	5,00	4,00	5,00	4,00	6,00	5,00	3,00	5,00	6,00	5,00	6,00	4,78	1,00
17_04_202	4,00	4,00	6,00	5,00	3,00	6,00	4,00	5,00	4,00	5,00	4,00	6,00	5,00	3,00	5,00	6,00	5,00	6,00	4,78	1,00

40 kg/m2																				
Date	ST40_1.1	ST40_1.2	ST40_1.3	ST40_1.4	ST40_1.5	ST40_1.6	ST40_2.1	ST40_2.2	ST40_2.3	ST40_2.4	ST40_2.5	ST40_2.6	ST40_3.1	ST40_3.2	ST40_3.3	ST40_3.4	ST40_3.5	ST40_3.6	Moyenne	Ecart-type
7_03_2023	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13_03_202	2,00	0,00	3,00	2,00	0,00	1,00	2,00	0,00	0,00	3,00	2,00	2,00	3,00	0,00	4,00	3,00	0,00	2,00	1,61	1,33
16_03_202	3,00	3,00	5,00	2,00	2,00	1,00	3,00	2,00	2,00	4,00	3,00	3,00	3,00	2,00	5,00	4,00	1,00	5,00	2,94	1,26
20-03_202	4,00	3,00	6,00	4,00	3,00	3,00	4,00	3,00	3,00	5,00	3,00	4,00	5,00	3,00	5,00	4,00	3,00	5,00	3,89	0,96
27_03_202	5,00	4,00	6,00	4,00	3,00	3,00	4,00	3,00	3,00	5,00	3,00	4,00	5,00	3,00	5,00	4,00	3,00	5,00	4,00	0,97
3_04_2023	5,00	4,00	6,00	4,00	3,00	3,00	4,00	4,00	3,00	6,00	3,00	4,00	5,00	3,00	5,00	4,00	4,00	5,00	4,17	0,99
11_04_202	5,00	4,00	7,00	4,00	3,00	4,00	4,00	4,00	3,00	6,00	3,00	5,00	5,00	3,00	5,00	4,00	4,00	5,00	4,33	1,08
17_04_202	5,00	4,00	7,00	4,00	3,00	4,00	6,00	4,00	3,00	6,00	3,00	5,00	5,00	3,00	5,00	4,00	4,00	5,00	4,44	1,15

Tableau A-17 : Données hebdomadaires, moyenne et écart type du nombre de panicules des plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻² de téphra au stade de floraison au cours de l'expérience

0,5 kg/m2

Date	ST0_5_1.1	ST0_5_1.2	ST0_5_1.3	ST0_5_1.4	ST0_5_1.5	ST0_5_1.6	ST0_5_2.1	ST0_5_2.2	ST0_5_2.3	ST0_5_2.4	ST0_5_2.5	ST0_5_2.6	ST0_5_3.1	ST0_5_3.2	ST0_5_3.3	ST0_5_3.4	ST0_5_3.5	ST0_5_3.6	Moyenne	Ecart-type
16_03_2023	1,00	2,00	3,00	1,00	1,00	2,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,91
20-03_2023	1,00	3,00	3,00	4,00	2,00	3,00	2,00	3,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	2,00	1,00	3,00	1,00	1,00	1,72	1,23
27_03_2023	3,00	4,00	3,00	4,00	3,00	4,00	4,00	5,00	4,00	4,00	1,00	3,00	0,00	3,00	3,00	6,00	3,00	3,00	3,33	1,33
3_04_2023	3,00	4,00	3,00	4,00	3,00	4,00	5,00	5,00	4,00	5,00	2,00	4,00	1,00	4,00	3,00	6,00	4,00	4,00	3,78	1,17
11_04_2023	3,00	4,00	3,00	5,00	3,00	4,00	5,00	5,00	4,00	6,00	2,00	4,00	1,00	4,00	3,00	7,00	5,00	4,00	4,00	1,41
17_04_2023	3,00	5,00	4,00	5,00	3,00	4,00	5,00	5,00	4,00	6,00	2,00	4,00	1,00	4,00	3,00	7,00	5,00	5,00	4,17	1,42

5 kg/m2

Date	ST5_1.1	ST5_1.2	ST5_1.3	ST5_1.5	ST5_1.6	ST5_2.1	ST5_2.2	ST5_2.3	ST5_2.4	ST5_2.5	ST5_3.1	ST5_3.2	ST5_3.3	ST5_3.4	ST5_3.5	ST5_3.6	Moyenne	Ecart-type
16_03_2023	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,06	0,25
20-03_2023	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	1,00	0,00	2,00	0,00	1,00	4,00	0,63	1,15
27_03_2023	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	2,00	4,00	0,00	1,00	3,00	3,00	4,00	3,00	3,00	6,00	1,88	1,89
3_04_2023	0,00	1,00	2,00	1,00	2,00	2,00	3,00	5,00	0,00	3,00	3,00	3,00	5,00	3,00	3,00	8,00	2,75	2,02
11_04_2023	1,00	2,00	2,00	2,00	3,00	2,00	4,00	6,00	1,00	3,00	3,00	3,00	4,00	3,00	3,00	8,00	3,13	1,78
17_04_2023	2,00	3,00	2,00	2,00	3,00	3,00	5,00	8,00	2,00	4,00	3,00	3,00	5,00	3,00	3,00	8,00	3,69	1,92

10 kg/m2

Date	ST10_1.1	ST10_1.2	ST10_1.3	ST10_1.4	ST10_1.5	ST10_1.6	ST10_2.2	ST10_2.3	ST10_2.6	ST10_3.1	ST10_3.2	ST10_3.3	ST10_3.4	ST10_3.5	ST10_3.6	Moyenne	Ecart-type
16_03_2023	1,00	0,00	2,00	0,00	0,00	3,00	0,00	1,00	1,00	0,00	1,00	3,00	3,00	4,00	5,00	1,60	1,64
20-03_2023	1,00	2,00	3,00	1,00	2,00	4,00	2,00	4,00	2,00	0,00	2,00	3,00	3,00	5,00	5,00	2,60	1,45
27_03_2023	3,00	4,00	3,00	3,00	5,00	5,00	3,00	5,00	6,00	3,00	3,00	3,00	4,00	5,00	5,00	4,00	1,07
3_04_2023	3,00	4,00	5,00	3,00	5,00	5,00	4,00	6,00	8,00	3,00	4,00	4,00	5,00	6,00	5,00	4,67	1,35
11_04_2023	3,00	4,00	5,00	4,00	5,00	5,00	4,00	6,00	8,00	3,00	5,00	5,00	6,00	6,00	6,00	5,00	1,31
17_04_2023	3,00	4,00	6,00	4,00	5,00	5,00	5,00	6,00	8,00	4,00	5,00	5,00	6,00	6,00	6,00	5,20	1,21

20 kg/m2

Date	ST20_1.1	ST20_1.2	ST20_1.3	ST20_1.4	ST20_1.5	ST20_1.6	ST20_2.1	ST20_2.2	ST20_2.3	ST20_2.4	ST20_2.5	ST20_2.6	ST20_3.1	ST20_3.2	ST20_3.3	ST20_3.4	ST20_3.5	ST20_3.6	Moyenne	Ecart-type
16_03_2023	1,00	5,00	5,00	1,00	3,00	4,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	2,00	0,00	1,00	5,00	1,61	1,91
20-03_2023	2,00	5,00	5,00	3,00	3,00	5,00	3,00	2,00	3,00	3,00	3,00	0,00	3,00	0,00	3,00	1,00	1,00	7,00	2,89	1,81
27_03_2023	3,00	5,00	6,00	4,00	3,00	5,00	4,00	3,00	4,00	4,00	4,00	3,00	3,00	2,00	3,00	4,00	3,00	7,00	3,89	1,23
3_04_2023	3,00	5,00	6,00	4,00	3,00	5,00	4,00	4,00	6,00	4,00	4,00	3,00	3,00	2,00	5,00	4,00	3,00	7,00	4,17	1,29
11_04_2023	3,00	5,00	6,00	4,00	3,00	5,00	4,00	4,00	6,00	4,00	4,00	3,00	3,00	3,00	5,00	4,00	3,00	7,00	4,22	1,22
17_04_2023	3,00	5,00	7,00	4,00	3,00	5,00	4,00	7,00	6,00	4,00	4,00	3,00	3,00	3,00	5,00	4,00	3,00	8,00	4,50	1,58

40 kg/m2

Date	ST40_1.1	ST40_1.2	ST40_1.3	ST40_1.4	ST40_1.5	ST40_1.6	ST40_2.1	ST40_2.2	ST40_2.3	ST40_2.4	ST40_2.5	ST40_2.6	ST40_3.1	ST40_3.2	ST40_3.3	ST40_3.4	ST40_3.5	ST40_3.6	Moyenne	Ecart-type
16_03_2023	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,43
20-03_2023	0,00	4,00	3,00	2,00	0,00	2,00	3,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	2,00	2,00	0,00	1,00	1,00	1,28	1,23
27_03_2023	3,00	4,00	4,00	3,00	2,00	2,00	4,00	3,00	4,00	3,00	3,00	0,00	3,00	4,00	5,00	3,00	4,00	4,00	3,22	1,11
3_04_2023	4,00	4,00	4,00	3,00	3,00	2,00	4,00	4,00	6,00	3,00	3,00	1,00	4,00	4,00	6,00	3,00	4,00	4,00	3,67	1,19
11_04_2023	4,00	5,00	5,00	4,00	3,00	6,00	4,00	4,00	6,00	3,00	4,00	2,00	4,00	4,00	6,00	3,00	4,00	4,00	4,17	1,10
17_04_2023	4,00	5,00	6,00	4,00	3,00	6,00	4,00	4,00	6,00	3,00	4,00	2,00	4,00	4,00	6,00	3,00	4,00	4,00	4,22	1,17

Tableau A-18 : Données relevé après récolte, tel que le nombre de tige, nombre de panicules totales, nombre de panicules brunes, ainsi que le pourcentage de panicules fêcondé qui en découle, sa moyenne et son écart-type pour le groupe témoin.

	Nombre de tiges	Nombre total de panicules	Nombre de panicules brunes	Nombre de panicules brunes	Nombre de panicules vertes	% de panicules brunes	% de panicules/tiges	% de panicules non sortie
	13	9	6	3	0,67	0,69	0,31	
IR29 1.1	7	5	5	0	1,00	0,71	0,29	
IR29 1.4	13	12	8	4	0,67	0,92	0,08	
IR29 1.6	7	6	6	0	1,00	0,86	0,14	
IR29 2.1	8	6	5	1	0,83	0,75	0,25	
IR29 2.2	14	12	8	4	0,67	0,86	0,14	
IR29 2.3	6	4	4	0	1,00	0,67	0,33	
IR29 2.4	7	7	4	3	0,57	1,00	0,00	
IR29 2.5	10	10	6	4	0,60	1,00	0,00	
IR29 2.6	10	10	7	3	0,70	1,00	0,00	
IR29 3.1	8	7	3	4	0,43	0,88	0,13	
IR29 3.2	12	11	3	8	0,27	0,92	0,08	
IR29 3.3	9	9	5	5	0,56	1,00	0,00	
IR29 3.4	10	10	5	5	0,50	1,00	0,00	
IR29 3.5	15	15	8	8	0,53	1,00	0,00	
IR29 3.6	8	8	4	4	0,50	1,00	0,00	
IR29 4.1	10	10	5	5	0,50	1,00	0,00	
IR29 4.2	15	15	10	6	0,67	1,00	0,00	
IR29 4.3	5	5	3	3	0,60	1,00	0,00	
IR29 4.4	8	8	5	4	0,63	1,00	0,00	
IR29 4.5	16	16	8	8	0,50	1,00	0,00	
IR29 4.6	8	7	4	3	0,57	0,88	0,13	
IR29 5.1	6	6	3	3	0,50	1,00	0,00	
IR29 5.2	10	10	6	4	0,60	1,00	0,00	
IR29 5.3	7	7	4	4	0,57	1,00	0,00	
IR29 5.4	9	6	5	1	0,83	0,67	0,33	
IR29 5.5	11	11	5	6	0,45	1,00	0,00	
IR29 5.6	7	5	2	3	0,40	0,71	0,29	
IR29 6.1	7	6	3	3	0,50	0,86	0,14	
IR29 6.2	16	16	9	7	0,56	1,00	0,00	
IR29 6.3					0,61	0,91	0,09	
Moyenne								

Tableau A-19 : Données relevé après récolte, tel que le nombre de tige, nombre de panicules totales, nombre de panicules brunes, ainsi que le pourcentage de panicules fécondé qui en découle, sa moyenne et son écart-type pour les plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻² de téphra au stade plantule.

	Nombre de tiges principales	Nombre de panicules totales	Nombre de panicules brunes	Nombre de panicules vertes	% de panicules brunes	% de panicules/ tiges	% de panicules non sortie
SP10_5_1.1	13	10	7	3	0,70	0,77	0,23
SP10_5_1.2	13	11	7	4	0,64	0,85	0,15
SP10_5_1.3	14	10	6	4	0,60	0,71	0,29
SP10_5_1.5	8	6	5	1	0,83	0,75	0,25
SP10_5_1.6	13	10	7	3	0,70	0,77	0,23
SP10_5_2.2	14	14	6	8	0,43	1,00	0,00
SP10_5_2.3	15	17	8	9	0,47	1,13	-0,13
SP10_5_2.4	19	15	6	9	0,40	0,79	0,21
SP10_5_2.5	11	10	4	6	0,40	0,91	0,09
SP10_5_2.6	15	14	6	8	0,43	0,93	0,07
SP10_5_3.1	12	11	4	7	0,36	0,92	0,08
SP10_5_3.2	9	9	4	5	0,44	1,00	0,00
SP10_5_3.3	11	11	4	7	0,36	1,00	0,00
SP10_5_3.4	14	10	6	4	0,60	0,71	0,29
SP10_5_3.5	14	12	4	8	0,33	0,86	0,14
SP10_5_3.6	12	12	3	9	0,25	1,00	0,00
Moyenne				■	0,50 ■	0,88 ■	0,12
SP15_1.1	13	11	6	5	0,55	0,85	0,15
SP15_1.3	22	18	11	7	0,61	0,82	0,18
SP15_1.4	11	8	4	4	0,50	0,73	0,27
SP15_1.5	16	13	7	6	0,54	0,81	0,19
SP15_2.2	32	18	15	3	0,83	0,56	0,44
SP15_2.4	16	9	8	1	0,89	0,56	0,44
SP15_3.1	13	13	5	8	0,38	1,00	0,00
SP15_3.2	18	16	7	9	0,44	0,89	0,11
SP15_3.4	17	14	7	7	0,50	0,82	0,18
SP15_3.5	19	18	8	10	0,44	0,95	0,05
Moyenne				■	0,57 ■	0,80 ■	0,20
SP110_1.1	13	10	5	5	0,50	0,77	0,23
SP110_1.2	9	9	4	5	0,44	1,00	0,00
SP110_1.3	12	12	4	8	0,33	1,00	0,00
SP110_1.1	14	12	5	7	0,42	0,86	0,14
SP110_1.6	20	19	8	11	0,42	0,95	0,05
SP110_2.4	15	11	9	2	0,82	0,73	0,27
SP110_2.6	19	15	12	3	0,80	0,79	0,21
SP110_3.1	9	8	5	3	0,63	0,89	0,11
SP110_3.2	13	13	6	7	0,46	1,00	0,00
SP110_3.3	10	10	5	5	0,50	1,00	0,00
SP110_3.4	11	11	5	6	0,45	1,00	0,00
SP110_3.5	10	8	4	4	0,50	0,80	0,20
SP110_3.6	13	11	6	5	0,55	0,85	0,15
Moyenne				■	0,52 ■	0,89 ■	0,11
SP120_1.4	10	10	4	6	0,40	1,00	0,00
SP120_1.2	9	7	4	3	0,57	0,78	0,22
SP120_1.3	18	15	8	7	0,53	0,83	0,17
SP120_1.5	10	10	5	5	0,50	1,00	0,00
SP120_1.6	14	10	6	4	0,60	0,71	0,29
SP120_2.1	16	13	6	7	0,46	0,81	0,19
SP120_2.3	12	11	5	6	0,45	0,92	0,08
SP120_2.4	15	10	7	3	0,70	0,67	0,33
SP120_2.5	9	9	6	3	0,67	1,00	0,00
SP120_2.6	9	5	5	0	1,00	0,56	0,44
SP120_3.1	12	9	7	2	0,78	0,75	0,25
SP120_3.2	5	3	3	0	1,00	0,60	0,40
SP120_3.3	9	9	5	4	0,56	1,00	0,00
SP120_3.5	6	3	3	0	1,00	0,50	0,50
SP120_3.6	14	14	9	5	0,64	1,00	0,00
Moyenne				■	0,66 ■	0,81 ■	0,19
SP140_1.1	7	7	4	3	0,57	1,00	0,00
SP140_1.2	11	11	3	8	0,27	1,00	0,00
SP140_1.3	14	14	6	8	0,43	1,00	0,00
SP140_1.4	13	13	6	7	0,46	1,00	0,00
SP140_1.5	11	10	7	3	0,70	0,91	0,09
SP140_1.6	6	6	2	4	0,33	1,00	0,00
SP140_2.1	13	13	8	5	0,62	1,00	0,00
SP140_2.2	12	12	6	6	0,50	1,00	0,00
SP140_2.3	5	5	4	1	0,80	1,00	0,00
SP140_2.4	12	11	7	4	0,64	0,92	0,08
SP140_2.5	6	6	5	1	0,83	1,00	0,00
SP140_3.1	9	9	4	5	0,44	1,00	0,00
SP140_3.2	11	10	7	3	0,70	0,91	0,09
SP140_3.3	11	11	7	4	0,64	1,00	0,00
SP140_3.4	9	9	6	3	0,67	1,00	0,00
SP140_3.5	13	11	9	2	0,82	0,85	0,15
SP140_3.6	12	12	6	6	0,50	1,00	0,00
Moyenne					0,58	0,98	0,02

Tableau A-20 : Données relevé après récolte, tel que le nombre de tige, nombre de panicules totales, nombre de panicules brunes, ainsi que le pourcentage de panicules fécondé qui en découle, sa moyenne et son écart-type pour les plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻² de téphra au stade tallage.

	Nombre de tiges principales	Nombre de panicules totales	Nombre de panicules brunes	Nombre de panicules vertes	% de panicules brunes	% de panicules /tiges	% de panicules non sortie
ST0.5 1.1	6	6	4	2	0,67	1,00	0,00
ST0.5 1.2	1	1	1	0	1,00	1,00	0,00
ST0.5 1.3	7	7	7	0	1,00	1,00	0,00
ST0.5 1.4	7	7	7	0	1,00	1,00	0,00
ST0.5 1.5	5	5	5	0	1,00	1,00	0,00
ST0.5 1.6	4	4	4	0	1,00	1,00	0,00
ST0.5 2.1	3	3	3	0	1,00	1,00	0,00
ST0.5 2.2	7	7	5	2	0,71	1,00	0,00
ST0.5 2.3	6	6	4	2	0,67	1,00	0,00
ST0.5 2.4	7	7	7	0	1,00	1,00	0,00
ST0.5 2.5	5	5	4	1	0,80	1,00	0,00
ST0.5 2.6	7	7	6	1	0,86	1,00	0,00
ST0.5 3.1	6	6	5	1	0,83	1,00	0,00
ST0.5 3.2	4	3	3	0	1,00	0,75	0,25
ST0.5 3.3	8	6	4	2	0,67	0,75	0,25
ST0.5 3.4	10	10	7	3	0,70	1,00	0,00
ST0.5 3.5	7	7	6	1	0,86	1,00	0,00
ST0.5 3.6	7	7	4	3	0,57	1,00	0,00
Moyenne				■	0,85 ■	0,97 ■	0,03
ST5 1.1 V	12	11	10	1	0,91	0,92	0,08
ST5 1.2	6	6	5	1	0,83	1,00	0,00
ST5 1.5	8	6	4	2	0,67	0,75	0,25
ST5 2.1	8	8	8	0	1,00	1,00	0,00
ST5 2.2	6	5	4	1	0,80	0,83	0,17
ST5 2.3	6	5	5	0	1,00	0,83	0,17
ST5 2.4	6	5	5	0	1,00	0,83	0,17
ST5 2.5	6	5	5	0	1,00	0,83	0,17
ST5 2.6	6	4	4	0	1,00	0,67	0,33
ST5 3.1	5	3	3	0	1,00	0,60	0,40
ST5 3.2	7	5	4	1	0,80	0,71	0,29
ST5 3.3	6	5	3	2	0,60	0,83	0,17
ST5 3.4	6	6	6	0	1,00	1,00	0,00
ST5 3.5	5	5	5	0	1,00	1,00	0,00
ST5 3.6	6	5	4	1	0,80	0,83	0,17
Moyenne				■	0,89 ■	0,84 ■	0,16
ST10 1.1	8	8	7	1	0,88	1,00	0,00
ST10 1.2	4	4	4	0	1,00	1,00	0,00
ST10 1.3	6	5	5	0	1,00	0,83	0,17
ST10 1.4	5	4	3	1	0,75	0,80	0,20
ST10 1.5	3	3	3	0	1,00	1,00	0,00
ST10 1.6	5	5	5	0	1,00	1,00	0,00
ST10 2.1	5	5	5	0	1,00	1,00	0,00
SPT10 2.2	4	4	4	0	1,00	1,00	0,00
ST10 2.3	6	5	5	0	1,00	0,83	0,17
ST10 2.4	8	6	6	0	1,00	0,75	0,25
ST10 2.5	4	4	4	0	1,00	1,00	0,00
ST10 2.6	4	4	3	1	0,75	1,00	0,00
ST10 3.1	6	5	5	0	1,00	0,83	0,17
ST10 3.2	6	4	4	0	1,00	0,67	0,33
ST10 3.3	9	6	6	0	1,00	0,67	0,33
ST10 3.4	8	5	5	0	1,00	0,63	0,38
ST10 3.5	6	4	4	0	1,00	0,67	0,33
ST10 3.6	8	5	5	0	1,00	0,63	0,38
Moyenne				■	0,97 ■	0,85 ■	0,15
ST20 1.1	4	4	4	0	1,00	1,00	0,00
ST20 1.2	5	5	4	1	0,80	1,00	0,00
ST20 1.3	6	6	6	0	1,00	1,00	0,00
ST20 1.4	6	6	5	1	0,83	1,00	0,00
ST20 1.5	6	5	5	0	1,00	0,83	0,17
ST20 1.6	3	3	3	0	1,00	1,00	0,00
ST20 2.1	5	5	5	0	1,00	1,00	0,00
ST20 2.2	6	6	6	0	1,00	1,00	0,00
ST20 2.3	4	4	4	0	1,00	1,00	0,00
ST20 2.4	6	6	6	0	1,00	1,00	0,00
ST20 2.5	3	3	3	0	1,00	1,00	0,00
ST20 2.6	6	6	5	1	0,83	1,00	0,00
ST20 3.1	6	6	6	0	1,00	1,00	0,00
ST20 3.2	3	3	3	0	1,00	1,00	0,00
ST20 3.3	8	6	6	0	1,00	0,75	0,25
ST20 3.4	6	6	6	0	1,00	1,00	0,00
ST20 3.5	5	5	4	1	0,80	1,00	0,00
ST20 3.6	5	5	5	0	1,00	1,00	0,00
Moyenne				■	0,96 ■	0,98 ■	0,02
ST40 1.1	7	6	5	1	0,83	0,86	0,14
ST40 1.2	3	2	2	0	1,00	0,67	0,33
ST40 1.3	8	8	8	0	1,00	1,00	0,00
ST40 1.4	4	4	4	0	1,00	1,00	0,00
ST40 1.5	5	5	5	0	1,00	1,00	0,00
ST40 1.6	7	7	7	0	1,00	1,00	0,00
ST40 2.1	6	6	5	1	0,83	1,00	0,00
ST40 2.2	7	7	7	0	1,00	1,00	0,00
ST40 2.3	7	7	7	0	1,00	1,00	0,00
ST40 2.4	10	10	6	4	0,60	1,00	0,00
ST40 2.5	3	3	3	0	1,00	1,00	0,00
ST40 2.6	5	4	4	0	1,00	0,80	0,20
ST40 3.1	7	6	6	0	1,00	0,86	0,14
ST40 3.2	4	4	4	0	1,00	1,00	0,00
ST40 3.3	5	4	4	0	1,00	0,80	0,20
ST40 3.4	3	5	5	0	1,00	1,00	0,00
ST40 3.5	5	5	5	0	1,00	1,00	0,00
ST40 3.6	9	8	8	0	1,00	0,89	0,11
Moyenne					0,96	0,94	0,06

Tableau A-21 : Données relevé après récolte, tel que le nombre de tige, nombre de panicules totales, nombre de panicules brunes, ainsi que le pourcentage de panicules fécondé qui en découle, sa moyenne et son écart-type, pour les plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻² de téphra au stade d'amorçage.

	Nombre de tiges principales	Nombre de panicules totales	Nombre de panicules brunes	Nombre de panicules vertes	% de panicules brunes	% de panicules/tiges	% de panicules non sortie
SPa0.5 1.1	6	6	6		1,00	1,00	0,00
SPa0.5 1.2	4	4	4		1,00	1,00	0,00
SPa0.5 1.3	7	7	7		1,00	1,00	0,00
SPa0.5 1.4	5	5	4	1	0,80	1,00	0,00
SPa0.5 1.5	5	5	5		1,00	1,00	0,00
SPa0.5 1.6	5	4	4		1,00	0,80	0,20
SPa0.5 2.1	4	4	3	1	0,75	1,00	0,00
SPa0.5 2.2	5	5	5		1,00	1,00	0,00
SPa0.5 2.3	7	6	6		1,00	0,86	0,14
SPa0.5 2.4	4	4	3	1	0,75	1,00	0,00
SPa0.5 2.5	6	6	5	1	0,83	1,00	0,00
SPa0.5 2.6	6	5	4	1	0,80	0,83	0,17
SPa0.5 3.1	4	4	4		1,00	1,00	0,00
SPa0.5 3.2	6	4	4		1,00	0,67	0,33
SPa0.5 3.3	7	5	5		1,00	0,71	0,29
SPa0.5 3.4	6	6	6		1,00	1,00	0,00
SPa0.5 3.5	8	6	6		1,00	0,75	0,25
SPa0.5 3.6	7	6	5	1	0,83	0,86	0,14
Moyenne					0,93	0,92	0,08
SPa5 1.1	6	6	4	2	0,67	1,00	0,00
SPa5 1.2	9	9	6	3	0,67	1,00	0,00
SPa5 1.3	8	8	7	1	0,88	1,00	0,00
SPa5 1.4	3	3	3		1,00	1,00	0,00
SPa5 1.5	4	4	3	1	0,75	1,00	0,00
SPa5 1.6	4	4	4		1,00	1,00	0,00
SPa5 2.1	4	4	4		1,00	1,00	0,00
SPa5 2.2	4	4	4		1,00	1,00	0,00
SPa5 2.3	5	5	5		1,00	1,00	0,00
SPa5 2.4	5	5	4	1	0,80	1,00	0,00
SPa5 2.5	4	4	4		1,00	1,00	0,00
SPa5 2.6	4	4	4		1,00	1,00	0,00
SPa5 3.1	5	5	5		1,00	1,00	0,00
SPa5 3.2	5	5	5		1,00	1,00	0,00
SPa5 3.3	6	6	6		1,00	1,00	0,00
SPa5 3.4	4	4	3	1	0,75	1,00	0,00
SPa5 3.5	6	5	5		1,00	0,83	0,17
SPa5 3.6	6	6	4	2	0,67	1,00	0,00
Moyenne					0,90	0,99	0,01
SPa10 1.1	7	5	4	1	0,80	0,71	0,29
SPa10 1.2	6	6	6		1,00	1,00	0,00
SPa10 1.4	5	5	5		1,00	1,00	0,00
SPa10 1.5	5	5	4	1	0,80	1,00	0,00
SPa10 2.1	4	4	4		1,00	1,00	0,00
SPa10 2.2	4	4	4		1,00	1,00	0,00
SPa10 2.3	8	7	7		1,00	0,88	0,13
SPa10 2.4	3	3	3		1,00	1,00	0,00
SPa10 2.5	5	5	4	1	0,80	1,00	0,00
SPa10 2.6	5	4	4		1,00	0,80	0,20
SPa10 3.1	5	5	5		1,00	1,00	0,00
SPa10 3.2	5	3	3		1,00	0,60	0,40
SPa10 3.3	5	5	5		1,00	1,00	0,00
SPa10 3.4	6	4	3	1	0,75	0,67	0,33
SPa10 3.5	7	6	6		1,00	0,86	0,14
SPa10 3.6	6	4	4		1,00	0,67	0,33
Moyenne					0,95	0,89	0,11
SPa20 1.1	6	5	4	1	0,80	0,83	0,17
SPa20 1.2	4	4	4		1,00	1,00	0,00
SPa20 1.3	7	6	6		1,00	0,86	0,14
SPa20 1.4	5	5	5		1,00	1,00	0,00
SPa20 1.5	5	4	4		1,00	0,80	0,20
SPa20 1.6	7	7	7		1,00	1,00	0,00
SPa20 2.1	6	6	6		1,00	1,00	0,00
SPa20 2.2	5	5	5		1,00	1,00	0,00
SPa20 2.3	4	4	4		1,00	1,00	0,00
SPa20 2.4	5	5	5		1,00	1,00	0,00
SPa20 2.5	5	5	5		1,00	1,00	0,00
SPa20 2.6	7	7	7		1,00	1,00	0,00
SPa20 3.1	5	5	5		1,00	1,00	0,00
SPa20 3.2	5	5	5		1,00	1,00	0,00
SPa20 3.3	6	6	5	1	0,83	1,00	0,00
SPa20 3.4	6	6	6		1,00	1,00	0,00
SPa20 3.5	5	5	5		1,00	1,00	0,00
SPa20 3.6	6	6	6		1,00	1,00	0,00
Moyenne					0,98	0,97	0,03
SPa40 1.1	6	6	5	1	0,83	1,00	0,00
SPa40 1.2	5	5	4	1	0,80	1,00	0,00
SPa40 1.3	7	7	7		1,00	1,00	0,00
SPa40 1.4	4	4	4		1,00	1,00	0,00
SPa40 1.5	3	3	3		1,00	1,00	0,00
SPa40 1.6	5	5	4	1	0,80	1,00	0,00
SPa40 2.1	8	6	5	1	0,83	0,75	0,25
SPa40 2.2	4	4	4		1,00	1,00	0,00
SPa40 2.3	5	5	4	1	0,80	1,00	0,00
SPa40 2.4	6	6	6		1,00	1,00	0,00
SPa40 2.5	3	3	3		1,00	1,00	0,00
SPa40 2.6	6	6	6		1,00	1,00	0,00
SPa40 3.1	5	5	5		1,00	1,00	0,00
SPa40 3.2	4	4	4		1,00	1,00	0,00
SPa40 3.3	5	5	5		1,00	1,00	0,00
SPa40 3.4	4	4	4		1,00	1,00	0,00
SPa40 3.5	4	4	4		1,00	1,00	0,00
SPa40 3.6	5	5	5		1,00	1,00	0,00
Moyenne					0,95	0,99	0,01

Tableau A-22 : Données relevé après récolte, tel que le nombre de tige, nombre de panicules totales, nombre de panicules brunes, ainsi que le pourcentage de panicules fécondé qui en découle, sa moyenne et son écart-type, pour les plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻² de téphra au stade de floraison.

	Nombre de tiges principales	Nombre de panicule totales	Nombre de panicules brunes	Nombre de panicules vertes	% de panicules brunes	% de panicules/tiges	% de panicules non sortie
SI0.5 1.1	3	3	3	0	1,00	1,00	0,00
SI0.5 1.2	5	4	4	0	1,00	0,80	0,20
SI0.5 1.3	6	4	4	0	1,00	0,67	0,33
SI0.5 1.4	5	5	4	1	0,80	1,00	0,00
SI0.5 1.5	3	3	3	0	1,00	1,00	0,00
SI0.5 1.6	5	5	5	0	1,00	1,00	0,00
SI0.5 2.1	6	6	6	0	1,00	1,00	0,00
SI0.5 2.2	6	5	5	0	1,00	0,83	0,17
SI0.5 2.3	4	4	4	0	1,00	1,00	0,00
SI0.5 2.4	6	6	6	0	1,00	1,00	0,00
SI0.5 2.5	2	2	2	0	1,00	1,00	0,00
SI0.5 2.6	5	5	4	1	0,80	1,00	0,00
SI0.5 3.1	1	1	1	0	1,00	1,00	0,00
SI0.5 3.2	4	4	4	0	1,00	1,00	0,00
SI0.5 3.3	4	3	3	0	1,00	0,75	0,25
SI0.5 3.4	7	7	7	0	1,00	1,00	0,00
SI0.5 3.5	5	5	4	1	0,80	1,00	0,00
SI0.5 3.6	4	4	4	0	1,00	1,00	0,00
Moyenne				0,97	0,95	0,05	
SI5 1.1	5	4	4	0	1,00	0,80	0,20
SI5 1.2	5	4	3	1	0,75	0,80	0,20
SI5 1.3	7	4	3	1	0,75	0,57	0,43
SI5 1.5	3	3	2	1	0,67	1,00	0,00
SI5 1.6	5	6	4	2	0,67	1,20	-0,20
SI5 2.1	3	3	2	1	0,67	1,00	0,00
SI5 2.2	4	4	3	1	0,75	1,00	0,00
SI5 2.3	9	9	5	4	0,56	1,00	0,00
SI5 2.4	2	2	2	0	1,00	1,00	0,00
SI5 2.5	5	5	3	2	0,60	1,00	0,00
SI5 3.1	3	3	3	0	1,00	1,00	0,00
SI5 3.2	4	3	3	0	1,00	0,75	0,25
SI5 3.3	5	5	5	0	1,00	1,00	0,00
SI5 3.4	4	4	3	1	0,75	1,00	0,00
SI5 3.5	3	3	3	0	1,00	1,00	0,00
SI5 3.6	8	8	8	0	1,00	1,00	0,00
Moyenne				0,82	0,95	0,05	
SI10 1.1	3	3	3	0	1,00	1,00	0,00
SI10 1.2	6	6	4	2	0,67	1,00	0,00
SI10 1.3	7	7	6	1	0,86	1,00	0,00
SI10 1.4	4	4	3	1	0,75	1,00	0,00
SI10 1.5	5	5	5	0	1,00	1,00	0,00
SI10 1.6	6	6	6	0	1,00	1,00	0,00
SI10 2.2	6	5	4	1	0,80	0,83	0,17
SI10 2.3	8	8	8	0	1,00	1,00	0,00
SI10 2.6	10	9	8	1	0,89	0,90	0,10
SI10 3.1	4	4	3	1	0,75	1,00	0,00
SI10 3.2	5	5	5	0	1,00	1,00	0,00
SI10 3.3	6	5	5	0	1,00	0,83	0,17
SI10 3.4	5	5	5	0	1,00	1,00	0,00
SI10 3.5	6	6	6	0	1,00	1,00	0,00
SI10 3.6	7	7	5	2	0,71	1,00	0,00
Moyenne				0,91	0,97	0,03	
SI20 1.1	3	3	3	0	1,00	1,00	0,00
SI20 1.2	6	6	6	0	1,00	1,00	0,00
SI20 1.3	7	7	7	0	1,00	1,00	0,00
SI20 1.4	4	4	4	0	1,00	1,00	0,00
SI20 1.5	3	3	3	0	1,00	1,00	0,00
SI20 1.6	5	5	5	0	1,00	1,00	0,00
SI20 2.1	4	4	4	0	1,00	1,00	0,00
SI20 2.2	4	4	4	0	1,00	1,00	0,00
SI20 2.3	9	6	5	1	0,83	0,67	0,33
SI20 2.4	5	5	4	1	0,80	1,00	0,00
SI20 2.5	4	4	4	0	1,00	1,00	0,00
SI20 2.6	4	3	3	0	1,00	0,75	0,25
SI20 3.1	3	3	3	0	1,00	1,00	0,00
SI20 3.2	2	2	2	0	1,00	1,00	0,00
SI20 3.3	5	5	5	0	1,00	1,00	0,00
SI20 3.4	5	4	4	0	1,00	0,80	0,20
SI20 3.5	3	3	3	0	1,00	1,00	0,00
SI20 3.6	8	8	8	0	1,00	1,00	0,00
Moyenne				0,98	0,96	0,04	
SI40 1.1	4	4	4	0	1,00	1,00	0,00
SI40 1.2	8	7	7	0	1,00	0,88	0,13
SI40 1.3	6	6	6	0	1,00	1,00	0,00
SI40 1.4	6	4	4	0	1,00	0,67	0,33
SI40 1.5	3	3	3	0	1,00	1,00	0,00
SI40 1.6	3	2	2	0	1,00	0,67	0,33
SI40 2.1	5	5	5	0	1,00	1,00	0,00
SI40 2.2	6	4	4	0	1,00	0,67	0,33
SI40 2.3	6	6	6	0	1,00	1,00	0,00
SI40 2.4	4	3	3	0	1,00	0,75	0,25
SI40 2.5	5	4	4	0	1,00	0,80	0,20
SI40 2.6	2	2	2	0	1,00	1,00	0,00
SI40 3.1	5	4	4	0	1,00	0,80	0,20
SI40 3.2	4	4	4	0	1,00	1,00	0,00
SI40 3.3	8	8	8	0	1,00	1,00	0,00
SI40 3.4	3	3	3	0	1,00	1,00	0,00
SI40 3.5	5	4	4	0	1,00	0,80	0,20
SI40 3.6	4	4	4	0	1,00	1,00	0,00
Moyenne				1,00	0,89	0,11	

Tableau A-23 : Résultats du test de Dunnett pour le nombre de panicules total aux stades plantule, stade tallage, stade paniculaire, et stade de floraison après traitement avec différentes charges de masse de téphra. meandiff: différence moyenne entre les plantes traitées aux cendres et les plantes témoins; lower : limites inférieures de l'intervalle de confiance à 95% de la différence moyenne; upper : limites supérieures de l'intervalle de confiance à 95% de la différence moyenne; p-valeur : statistique de l'essai.

growth stage	ash mass load (kg m-2)	meandiff	p-adj	lower	upper	reject
Stade plantule	0,5	-2.4083	0.0388	-4.7654	-0.0512	*
	5	-4.8333	0.0	-7.6136	-2.053	***
	10	-2.4949	0.058	-5.0231	0.0334	
	20	-0.2333	1.0	-2.6411	2.1745	
	40	-1.0333	0.9908	-3.3448	1.2781	
Stade tallage	0,5	3.1889	0.0001	0.9188	5.459	***
	5	3.3667	0.0002	0.9589	5.7745	***
	10	4.1889	0.0	1.9188	6.459	***
	20	3.9667	0.0	1.6966	6.2368	***
	40	3.4667	0.0	1.1966	5.7368	***
Stade paniculaire	0,5	3.8556	0.0	1.5855	6.1257	***
	5	3.9111	0.0	1.641	6.1812	***
	10	4.2792	0.0	1.9221	6.6363	***
	20	3.6333	0.0	1.3632	5.9034	***
	40	4.1333	0.0	1.8632	6.4034	***
Stade de floraison	0,5	4.7444	0.0	2.4743	7.0145	***
	5	4.7359	0.0	2.2076	7.2642	***
	10	3.5	0.0001	1.0922	5.9078	***
	20	4.3476	0.0	2.1812	6.514	***
	40	4.6889	0.0	2.4188	6.959	***

Tableau A-24 : Résultats du test de Dunnett pour le nombre de panicules fécondés aux stades plantule, stade tallage, stade paniculaire, et stade de floraison après traitement avec différentes charges de masse de téphra. meandiff: différence moyenne entre les plantes traitées aux cendres et les plantes témoins; lower : limites inférieures de l'intervalle de confiance à 95% de la différence moyenne; upper : limites supérieures de l'intervalle de confiance à 95% de la différence moyenne; p-valeur : statistique de l'essai.

growth stage	ash mass load (kg m-2)	meandiff	p-adj	lower	upper	reject
Stade plantule	0,5	11.5635	0.4248	-3.6221	26.7491	
	5	4.428	1.0	-13.4839	22.3399	
	10	8.8029	0.9329	-7.4854	25.0912	
	20	-4.492	1.0	-20.0042	11.0202	
	40	2.9231	1.0	-11.9684	17.8145	
Stade tallage	0,5	-23.919	0.0	-38.544	-9.294	***
	5	-28.128	0.0	-43.6402	-12.6158	***
	10	-35.2618	0.0	-49.8868	-20.6367	***
	20	-34.6596	0.0	-49.2846	-20.0345	***
	40	-34.6596	0.0	-49.2846	-20.0345	***
Stade paniculaire	0,5	-31.8818	0.0	-46.5068	-17.2567	***
	5	-28.5957	0.0	-43.2207	-13.9706	***
	10	-27.1715	0.0	-42.3571	-11.9859	***
	20	-36.6968	0.0	-51.3218	-22.0717	***
	40	-33.5484	0.0	-48.1735	-18.9234	***
Stade de floraison	0,5	-35.4007	0.0	-50.0257	-20.7756	***
	5	-18.7778	0.0072	-35.0661	-2.4896	**
	10	-28.4853	0.0	-43.9975	-12.9731	***
	20	-35.6273	0.0	-49.5842	-21.6705	***
	40	-38.734	0.0	-53.359	-24.109	***

Tableau A-25 : Nombre d'épillets total après récolte des plantes témoins et des plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻² de téphra aux stades stade plantule, stade tallage, stade d'amorçage stade floraison.

Témoins	Nombre d'épillets total	Stade tallage	Nombre d'épillets total	Stade de floraison	Nombre d'épillets total
TIR29 1.1	293	ST0,5_1.1	672	SL0,5_1.1	676
TIR29 2.1	865	ST0,5_2.1	609	SL0,5_2.1	949
TIR29 3.1	1135	ST0,5_3.1	758	SL0,5_3.1	756
TIR29 4.1	924	ST5_1.1	519	SL5_1.1	260
TIR29 5.1	717	ST5_2.1	833	SL5_2.1	663
TIR29 6.1	383	ST5_3.1	643	SL5_3.1	783
		ST10_1.1	591	SL10_1.1	676
		ST10_2.1	879	SL10_2.2	595
		ST10_3.1	910	SL10_3.1	927
		ST20_1.1	953	SL20_1.1	618
		ST20_2.1	976	SL20_2.1	601
		ST20_3.1	884	SL20_2.6	598
		ST40_1.1	934	SL40_1.1	635
		ST40_2.1	969	SL40_2.1	623
		ST40_3.1	734	SL40_3.1	688
Moyenne	719,50		790,93		669,87
Ecart-type	325,81		154,09		159,08

Stade plantule	Nombre d'épillets total	Stade d'amorçage	Nombre d'épillets total
SPI0,5_1.1	956	SPa0,5_1.1	822
SPI0,5_2.2	959	SPa0,5_2.1	804
SPI0,5_3.1	836	SPa0,5_3.1	949
SPI5_1.1	1041	SPa5_1.1	1046
SPI5_2.2	848	SPa5_2.1	926
SPI5_3.1	1127	SPa5_3.1	964
SPI10_1.1	1037	SPa10_1.1	742
SPI10_2.4	848	SPa10_2.1	928
SPI10_3.1	1025	SPa10_3.1	892
SPI20_1.4	1192	SPa20_1.1	742
SPI20_2.1	1265	SPa20_2.1	658
SPI20_3.1	1356	SPa20_3.1	676
SPI40_1.1	1249	SPa40_1.1	574
SPI40_2.1	1022	SPa40_2.1	833
SPI40_3.1	1220	SPa40_3.1	821
Moyenne	1065,40		825,13
Ecart-type	164,12		129,90

Tableau A-26 : Résultats du test de Dunnett pour le nombre d'épillets aux stades plantule, stade tallage, stade paniculaire, et stade de floraison après traitement avec différentes charges de masse de téphra. meandiff: différence moyenne entre les plantes traitées aux cendres et les plantes témoins; lower : limites inférieures de l'intervalle de confiance à 95% de la différence moyenne; upper : limites supérieures de l'intervalle de confiance à 95% de la différence moyenne; p-valeur : statistique de l'essai.

growth stage	ash mass load (kg m-2)	meandiff	p-adj	lower	upper	reject
Stade plantule	0,5	-197.5	0.9663	-623.2928	228.2928	
	5	-285.8333	0.5809	-711.6261	139.9595	
	10	-250.5	0.787	-676.2928	175.2928	
	20	-521.1667	0.0045	-946.9595	-95.3739	**
	40	-444.1667	0.0325	-869.9595	-18.3739	*
Stade tallage	0,5	39.8333	1.0	-385.9595	465.6261	
	5	54.5	1.0	-371.2928	480.2928	
	10	-73.8333	1.0	-499.6261	351.9595	
	20	-218.1667	0.9196	-643.9595	207.6261	
	40	-159.5	0.9967	-585.2928	266.2928	
Stade paniculaire	0,5	-138.8333	0.9994	-564.6261	286.9595	
	5	-259.1667	0.7405	-684.9595	166.6261	
	10	-134.5	0.9996	-560.2928	291.2928	
	20	27.5	1.0	-398.2928	453.2928	
	40	-23.1667	1.0	-448.9595	402.6261	
Stade de floraison	0,5	-74.1667	1.0	-499.9595	351.6261	
	5	150.8333	0.9983	-274.9595	576.6261	
	10	-13.1667	1.0	-438.9595	412.6261	
	20	113.8333	1.0	-311.9595	539.6261	
	40	70.8333	1.0	-354.9595	496.6261	

Tableau A-27 : Nombre d'épillets remplis, total et pourcentage d'épillets rempli après récolte pour les témoins.

Test	Nombre d'épillets remplis	Nombre d'épillets vides	Nombre d'épillets total	% d'épillets rempli	Moyenne par test
TIR29 1.4	27	4	31	0,870967742	0,847218624
TIR29 1.6	17	5	22	0,772727273	
TIR29 2.3	62	11	73	0,849315068	
TIR29 2.5	50	5	55	0,909090909	
TIR29 3.4	105	16	121	0,867768595	
TIR29 3.6	44	15	59	0,745762712	
TIR29 4.1	75	12	87	0,862068966	
TIR29 4.4	56	12	68	0,823529412	
TIR29 5.3	61	6	67	0,910447761	
TIR29 5.6	24	8	32	0,75	
TIR29 6.1	25	3	28	0,892857143	0,912087912
TIR29 6.3	83	8	91	0,912087912	

Tableau A-28 : Nombre d'épillets remplis, total et pourcentage d'épillets fertiles après récolte pour les plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻² de téphra au stade plantule.

Test	Nombre d'épillets remplis	Nombre d'épillets vides	Nombre d'épillets total	% d'épillets rempli	Moyenne par test
SPI0,5_1.2	82	31	113	0,725663717	0,685368958
SPI0,5_1.5	30	8	38	0,789473684	
SPI0,5_2.2	51	17	68	0,75	
SPI0,5_2.4	85	28	113	0,752212389	
SPI0,5_3.3	42	37	79	0,53164557	
SPI0,5_3.5	49	38	87	0,563218391	0,824082577
SPI5_1.1	76	25	101	0,752475248	
SPI5_1.4	41	8	49	0,836734694	
SPI5_2.2	42	3	45	0,933333333	
SPI5_2.4	128	15	143	0,895104895	
SPI5_3.1	29	6	35	0,828571429	0,841457993
SPI5_3.5	81	35	116	0,698275862	
SPI10_1.1	29	3	32	0,90625	
SPI10_1.4	56	10	66	0,848484848	
SPI10_2.4	37	9	46	0,804347826	
SPI10_2.6	104	11	115	0,904347826	0,864962513
SPI10_3.5	19	2	21	0,904761905	
SPI10_3.6	49	23	72	0,680555556	
SPI20_1.4	42	4	46	0,913043478	
SPI20_1.6	68	16	84	0,80952381	
SPI20_2.3	36	9	45	0,8	0,837670085
SPI20_2.5	35	5	40	0,875	
SPI20_3.2	53	2	55	0,963636364	
SPI20_3.5	87	18	105	0,828571429	
SPI40_1.2	89		89	1	
SPI40_1.6	46	6	52	0,884615385	0,784722222
SPI40_2.4	113	31	144	0,784722222	
SPI40_2.5	49	6	55	0,890909091	
SPI40_3.2	67	29	96	0,697916667	
SPI40_3.5	43	13	56	0,767857143	

Tableau A-29 : Nombre d'épillets remplis, total et pourcentage d'épillets fertiles après récolte pour les plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m-2 de téphra au stade tallage.

Test	Nombre d'épillets remplis	Nombre d'épillets vides	Nombre d'épillets total	% d'épillets rempli	Moyenne par test
ST0,5_1.3	87	18	105	0,828571429	0,809749053
ST0,5_1.5	54	20	74	0,72972973	
ST0,5_2.3	106	21	127	0,834645669	
ST0,5_2.4	67	12	79	0,848101266	
ST0,5_3.2	85	16	101	0,841584158	
ST0,5_3.3	90	26	116	0,775862069	0,722685796
ST5_1.1	37	27	64	0,578125	
ST5_2.1	46	14	60	0,766666667	
ST5_2.2	98	15	113	0,867256637	
ST5_2.6	67	26	93	0,720430108	
ST5_3.2	27	23	50	0,54	0,80810446
ST5_3.4	57	9	66	0,863636364	
ST10_1.1	59	14	73	0,808219178	
ST10_1.3	53	9	62	0,85483871	
ST10_2.1	84	28	112	0,75	
ST10_2.3	50	12	62	0,806451613	0,853204647
ST10_3.2	95	20	115	0,826086957	
ST10_3.4	53	13	66	0,803030303	
ST20_1.2	75	27	102	0,735294118	
ST20_1.6	62	6	68	0,911764706	
ST20_2.2	95	19	114	0,833333333	0,83609661
ST20_2.5	39	5	44	0,886363636	
ST20_3.3	46	11	57	0,807017544	
ST20_3.4	52	3	55	0,945454545	
ST40_1.3	101	10	111	0,90990991	
ST40_1.4	89	19	108	0,824074074	0,843478261
ST40_2.3	92	24	116	0,793103448	
ST40_3.1	98	23	121	0,809917355	
ST40_3.6	97	18	115	0,843478261	

Tableau A-30 : Nombre d'épillets remplis, total et pourcentage d'épillets fertiles après récolte pour les plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m-2 de téphra au stade d'amorçage.

Test	Nombre d'épillets remplis	Nombre d'épillets vides	Nombre d'épillets total	% d'épillets rempli	Moyenne par test
SPa0,5_1.2	63	16	79	0,797468354	79,35183054
SPa0,5_1.6	83	24	107	0,775700935	
SPa0,5_2.3	93	15	108	0,861111111	
SPa0,5_2.5	43	16	59	0,728813559	
SPa0,5_3.3	29	11	40	0,725	
SPa0,5_3.5	110	16	126	0,873015873	86,21007533
SPa5_1.3	89	13	102	0,87254902	
SPa5_1.4	90	9	99	0,909090909	
SPa5_2.2	110	16	126	0,873015873	
SPa5_2.5	64	16	80	0,8	
SPa5_3.2	69	9	78	0,884615385	83,50792093
SPa5_3.5	75	15	90	0,833333333	
SPa10_1.2	113	28	141	0,80141844	
SPa10_1.6	76	9	85	0,894117647	
SPa10_2.3	31	12	43	0,720930233	
SPa10_2.5	42	7	49	0,857142857	80,48597103
SPa10_3.3	74	15	89	0,831460674	
SPa10_3.6	67	7	74	0,905405405	
SPa20_1.4	44	6	50	0,88	
SPa20_1.6	89	18	107	0,831775701	
SPa20_2.4	11	4	15	0,733333333	81,44668247
SPa20_2.5	79	17	96	0,822916667	
SPa20_3.4	94	17	111	0,846846847	
SPa20_3.6	30	12	42	0,714285714	
SPa40_1.2	69	22	91	0,758241758	
SPa40_1.4	86	13	99	0,868686869	0,847058824
SPa40_2.1	64	22	86	0,744186047	
SPa40_2.6	90	18	108	0,833333333	
SPa40_3.1	71	14	85	0,835294118	
SPa40_3.6	72	13	85	0,847058824	

Tableau A-31 : Nombre d'épillets remplis, total et pourcentage d'épillets fertiles après récolte pour les plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m-2 de téphra au stade de floraison.

Test	Nombre d'épillets remplis	Nombre d'épillets vides	Nombre d'épillets total	% d'épillets rempli	Moyenne par test
SL0,5_1	9	8	17	52,94117647	74,74465796
	82	12	94	87,23404255	
SL0,5_2	74	23	97	76,28865979	
	77	14	91	84,61538462	
SL0,5_3	41	17	58	70,68965517	
	79	24	103	76,69902913	
SL5_2	95	22	117	81,1965812	82,7009491
	67	16	83	80,72289157	
SL5_3	96	17	113	84,95575221	
	94	18	112	83,92857143	
SL10_1	71	29	100	71	82,37566404
	88	13	101	87,12871287	
SL10_2	93	23	116	80,17241379	
	87	10	97	89,69072165	
SL10_3	27	9	36	75	
	94	9	103	91,26213592	
SL20_1	96	12	108	88,88888889	78,59151315
	47	10	57	82,45614035	
SL20_2	61	21	82	74,3902439	
	55	25	80	68,75	
SL20_3	58	19	77	75,32467532	
	94	21	115	81,73913043	
SL40_1	46	19	65	70,76923077	77,08964878
	110	9	119	92,43697479	
SL40_2	34	11	45	75,55555556	
	78	38	116	67,24137931	
SL40_3	44	18	62	70,96774194	
	83	14	97	85,56701031	

Tableau A-32 : Résultats du test de Dunnett pour le taux d'épillets fertiles aux stades plantule, stade tallage, stade paniculaire, et stade de floraison après traitement avec différentes charges de masse de téphra. meandiff: différence moyenne entre les plantes traitées aux cendres et les plantes témoins; lower : limites inférieures de l'intervalle de confiance à 95% de la différence moyenne; upper : limites supérieures de l'intervalle de confiance à 95% de la différence moyenne; p-valeur : statistique de l'essai.

growth stage	ash mass load (kg m-2)	meandiff	p-adj	lower	upper	reject
Stade plantule	0,5	0.1617	0.0131	0.0166	0.3067	***
	5	0.0217	1.0	-0.1234	0.1667	
	10	0.0067	1.0	-0.1384	0.1517	
	20	-0.0183	1.0	-0.1634	0.1267	
	40	0.01	1.0	-0.135	0.155	
Stade tallage	0,5	0.0367	1.0	-0.1084	0.1817	
	5	0.1233	0.2093	-0.0217	0.2684	
	10	0.0383	1.0	-0.1067	0.1834	
	20	-0.0083	1.0	-0.1534	0.1367	
	40	0.0127	1.0	-0.1417	0.1671	
Stade paniculaire	0,5	0.0517	0.9992	-0.0934	0.1967	
	5	-0.0133	1.0	-0.1584	0.1317	
	10	0.0117	1.0	-0.1334	0.1567	
	20	0.0433	0.9999	-0.1017	0.1884	
	40	0.0317	1.0	-0.1134	0.1767	
Stade de floraison	0,5	0.0983	0.6233	-0.0467	0.2434	
	5	0.0192	1.0	-0.1483	0.1866	
	10	0.0233	1.0	-0.1217	0.1684	
	20	0.0617	0.9927	-0.0834	0.2067	
	40	0.075	0.9433	-0.07	0.22	

Tableau A-33 : Poids frais, sec des épillets et pourcentage d'humidité dans les épillets des groupes témoins.

Test	Poid sachet (g)	Poid épillet frais (avec sachet) (g)	Poid épillet sec (avec sachet) (g)	Poid épillet frais (sans sachet) (g)	Poid épillet sec (sans sachet) (g)	Humidité épillet (%)
TIR29 1.1	5,29	12,15	9,89	6,86	4,6	32,94
TIR29 1.4	5,24	8,71	7,52	3,47	2,28	34,29
TIR29 1.6	5,21	10,87	9,03	5,66	3,82	32,51
TIR29 2.1	5,2	11,58	9,92	6,38	4,72	26,02
TIR29 2.2	5,2	12,22	10,42	7,02	5,22	25,64
TIR29 2.3	5,19	19,21	15,56	14,02	10,37	26,03
TIR29 2.4	5,12	10,78	9,37	5,66	4,25	24,91
TIR29 2.5	5,15	11,72	10	6,57	4,85	26,18
TIR29 2.6	5,11	12,93	11,09	7,82	5,98	23,53
TIR29 3.1	5,05	14,11	11,36	9,06	6,31	30,35
TIR29 3.2	5,17	11,75	9,93	6,58	4,76	27,66
TIR29 3.3	5,18	16,56	13,31	11,38	8,13	28,56
TIR29 3.4	5,09	15,25	12,44	10,16	7,35	27,66
TIR29 3.5	5,08	14,22	11,45	9,14	6,37	30,31
TIR29 3.6	5,07	18,64	14,47	13,57	9,4	30,73
TIR29 4.1	5,11	10,49	9,01	5,38	3,9	27,51
TIR29 4.2	5,17	12,74	10,62	7,57	5,45	28,01
TIR29 4.3	5,11	15,9	12,73	10,79	7,62	29,38
TIR29 4.4	5,13	9,97	8,68	4,84	3,55	26,65
TIR29 4.5	5,14	12,16	10,19	7,02	5,05	28,06
TIR29 4.6	5,07	18,39	14,48	13,32	9,41	29,35
TIR29 5.1	5,24	13,87	11,4	8,63	6,16	28,62
TIR29 5.2	5,18	8,65	7,61	3,47	2,43	29,97
TIR29 5.3	5,04	13,98	11,51	8,94	6,47	27,63
TIR29 5.4	5,04	10,69	8,73	5,65	3,69	34,69
TIR29 5.5	5,08	12,23	10,1	7,15	5,02	29,79
TIR29 5.6	5,11	9,56	7,99	4,45	2,88	35,28
TIR29 6.1	5,12	7,21	6,52	2,09	1,4	33,01
TIR29 6.2	5,14	8,38	7,26	3,24	2,12	34,57
TIR29 6.3	5,15	21,22	15,56	16,07	10,41	35,22

Tableau A-34 : Poids frais, sec des épillets et pourcentage d'humidité dans les épillets des plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻² de téphra au stade plantule.

Test	Poid sachet (g)	Poid épillet frais (avec sachet) (g)	Poid épillet sec (avec sachet) (g)	Poid épillet frais (sans sachet) (g)	Poid épillet sec (sans sachet) (g)	Humidité épillet (%)
SP10_5_1.1	5,05	15,16	12,31	7,26	10,11	28,19
SP10_5_1.2	5,16	14,34	11,86	6,7	9,18	27,02
SP10_5_1.3	5,11	13,45	11,39	6,28	8,34	24,70
SP10_5_1.5	5,2	12,09	10,08	4,88	6,89	29,17
SP10_5_1.6	5,18	17,48	13,99	8,81	12,3	28,37
SP10_5_2.2	5,09	13,47	11,12	6,03	8,38	28,04
SP10_5_2.3	5,05	16,57	12,97	7,92	11,52	31,25
SP10_5_2.4	5,11	15,23	12,55	7,44	10,12	26,48
SP10_5_2.5	5,15	10,66	9,27	4,12	5,51	25,23
SP10_5_2.6	5,21	14,66	11,88	6,67	9,45	29,42
SP10_5_3.1	5,17	10,43	8,94	3,77	5,26	28,33
SP10_5_3.2	5,3	10,57	9,3	4	5,27	24,10
SP10_5_3.3	5,25	9,94	8,68	3,43	4,69	26,87
SP10_5_3.4	5,28	13,54	11,75	6,47	8,26	21,67
SP10_5_3.5	5,29	13,63	11,22	5,93	8,34	28,90
SP10_5_3.6	5,27	11,09	9,54	4,27	5,82	26,63
SP15_1.1	5,31	15,89	13,06	7,75	10,58	26,75
SP15_1.3	5,36	26,01	20,11	14,75	20,65	28,57
SP15_1.4	5,43	11,53	9,99	4,56	6,1	25,25
SP15_1.5	5,4	17,77	14,55	9,15	12,37	26,03
SP15_2.2	5,44	32,46	25,37	19,93	27,02	26,24
SP15_2.4	5,52	21,08	17,06	11,54	15,56	25,84
SP15_3.1	5,5	13,67	11,43	5,93	8,17	27,42
SP15_3.2	5,47	21,39	16,7	11,23	15,92	29,46
SP15_3.4	5,43	16,02	13,41	7,98	10,59	24,65
SP15_3.5	5,45	17,16	14,5	9,05	11,71	22,72
SP110_1.1	5,53	13,84	11,57	6,04	8,31	27,32
SP110_1.2	5,56	11,55	10,1	4,54	5,99	24,21
SP110_1.3	5,5	13,17	11,44	5,94	7,67	22,56
SP110_1.4	5,56	13,73	11,9	6,34	8,17	22,40
SP110_1.6	5,41	18,85	15,88	10,47	13,44	22,10
SP110_2.4	5,44	22,1	18,01	12,57	16,66	24,55
SP110_2.6	5,51	27,21	22,34	16,83	21,7	22,44
SP110_3.1	5,43	11,21	9,89	4,46	5,78	22,84
SP110_3.2	5,5	15	12,86	7,36	9,5	22,53
SP110_3.4	5,42	12,09	10,63	5,21	6,67	21,89
SP110_3.5	5,45	10,26	9,18	3,73	4,81	22,45
SP110_3.6	5,48	12,66	10,7	5,22	7,18	27,30
SP120_1.1	5,41	14,24	12,26	6,85	8,83	22,42
SP120_1.2	5,46	13,8	10,75	5,29	8,34	36,57
SP120_1.3	5,38	17,71	15,18	9,8	12,33	20,52
SP120_1.5	5,41	13,84	11,99	6,58	8,43	21,95
SP120_1.6	5,37	15,47	13,14	7,77	10,1	23,07
SP120_2.1	5,3	18,38	14,97	9,67	13,08	26,07
SP120_2.3	5,37	13,58	11,53	6,16	8,21	24,97
SP120_2.4	5,4	17,66	14,67	9,27	12,26	24,39
SP120_2.5	5,37	13,93	12,09	6,72	8,56	21,50
SP120_2.6	5,33	15,1	12,9	7,57	9,77	22,52
SP120_3.1	5,33	17,37	14,77	9,44	12,04	21,59
SP120_3.2	5,39	13,43	11,79	6,4	8,04	20,40
SP120_3.5	5,29	12,33	10,93	5,64	7,04	19,89
SP120_3.6	5,34	21,7	17,74	12,4	16,36	24,21
SP140_1.1	5,32	11,97	10,44	5,12	6,65	23,01
SP140_1.2	5,42	11,11	9,9	4,48	5,69	21,27
SP140_1.3	5,32	15,81	13,28	7,96	10,49	24,12
SP140_1.4	5,28	15,58	13,31	8,03	10,3	22,04
SP140_1.5	5,19	15,91	13,17	7,98	10,72	25,56
SP140_1.6	5,25	9,76	8,78	3,53	4,51	21,73
SP140_2.1	5,27	18,38	15,27	10	13,11	23,72
SP140_2.2	5,27	15,01	12,7	7,43	9,74	23,72
SP140_2.3	5,25	9,56	8,44	3,19	4,31	25,99
SP140_2.4	5,31	16,4	14,95	9,64	11,09	13,07
SP140_2.5	5,28	12,37	10,6	5,32	7,09	24,96
SP140_3.1	5,18	11,5	9,9	4,72	6,32	25,32
SP140_3.2	5,08	14,32	12,19	7,11	9,24	23,05
SP140_3.3	5,19	15,65	12,86	7,67	10,46	26,67
SP140_3.4	5,2	11,62	9,86	4,66	6,42	27,41
SP140_3.5	5,17	16,03	12,72	7,55	10,86	30,48
SP140_3.6	5,21	11,31	9,58	4,37	6,1	28,36

Tableau A-35 : Poids frais, sec des épillets et pourcentage d'humidité dans les épillets des plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m-2 de téphra au stade tallage.

Test	Poid sachet (g)	Poid épillet frais (avec sachet) (g)	Poid épillet sec (avec sachet) (g)	Poid épillet frais (sans sachet) (g)	Poid épillet sec (sans sachet) (g)	Humidité épillet (%)
ST0_5_1.1	5,18	14,48	11,74	6,56	9,3	29,46
ST0_5_1.2	5,18	7,23	6,66	1,48	2,05	27,80
ST0_5_1.3	5,15	16,15	13,05	7,9	11	28,18
ST0_5_1.4	5,24	17,67	14,06	8,82	12,43	29,04
ST0_5_1.5	5,25	12,72	10,58	5,33	7,47	28,65
ST0_5_1.6	5,2	15,13	12,12	6,92	9,93	30,31
ST0_5_2.1	5,17	10,47	9,01	3,84	5,3	27,55
ST0_5_2.2	5,15	13,14	10,6	5,45	7,99	31,79
ST0_5_2.3	5,25	14,64	12,13	6,88	9,39	26,73
ST0_5_2.4	5,31	15,11	12,51	7,2	9,8	26,53
ST0_5_2.5	5,24	11,62	9,72	4,48	6,38	29,78
ST0_5_2.6	5,25	13,43	10,62	5,37	8,18	34,35
ST0_5_3.1	5,12	13,58	11,3	6,18	8,46	26,95
ST0_5_3.2	5,32	9,82	8,65	3,33	4,5	26,00
ST0_5_3.3	5,19	13,25	10,81	5,62	8,06	30,27
ST0_5_3.4	5,16	17,96	14,29	9,13	12,8	28,67
ST0_5_3.5	5,18	16,04	13,02	7,84	10,86	27,81
ST0_5_3.6	5,2	13,74	11,45	6,25	8,54	26,81
ST5_1.1V	5,21	22,68	17,64	12,43	17,47	28,85
ST5_1.2	5,14	11,95	10,27	5,13	6,81	24,67
ST5_1.5	5,16	14,39	11,52	6,36	9,23	31,09
ST5_2.1	5,16	16,31	13,62	8,46	11,15	24,13
ST5_2.2	5,1	13,41	11,12	6,02	8,31	27,56
ST5_2.3	5,09	13,91	10,85	5,76	8,82	34,69
ST5_2.4	5,17	11,56	9,95	4,78	6,39	25,20
ST5_2.5	5,24	14,89	12,43	7,19	9,65	25,49
ST5_2.6	5,18	13,02	11,08	5,9	7,84	24,74
ST5_3.1	5,22	10,6	9,03	3,81	5,38	29,18
ST5_3.2	5,21	12,88	10,74	5,53	7,67	27,90
ST5_3.3	5,12	10,7	8,91	3,79	5,58	32,08
ST5_3.4	5,2	17,26	14,41	9,21	12,06	23,63
ST5_3.5	5,14	11,84	9,8	4,66	6,7	30,45
ST5_3.6	5,18	13,47	11,27	6,09	8,29	26,54
ST10_1.1	5,26	16,9	13,55	8,29	11,64	28,78
ST10_1.2	5,29	11,83	9,82	4,53	6,54	30,73
ST10_1.3	5,12	13,15	10,95	5,83	8,03	27,40
ST10_1.4	5,17	11,79	9,68	4,51	6,62	31,87
ST10_1.5	5,22	9	7,76	2,54	3,78	32,80
ST10_1.6	5,14	14,8	11,78	6,64	9,66	31,26
ST10_2.1	5,11	13,51	11,94	6,83	8,4	18,69
SPT10_2.2	5,22	12,95	10,53	5,31	7,73	31,31
ST10_2.3	5,01	15,2	12	6,99	10,19	31,40
ST10_2.4	5,11	16,57	13,02	7,91	11,46	30,98
ST10_2.5	5,29	12,67	10,33	5,04	7,38	31,71
ST10_2.6	5,22	11,65	9,51	4,29	6,43	33,28
ST10_3.1	5,15	14,24	11,49	6,34	9,09	30,25
ST10_3.2	5,17	12,32	10,21	5,04	7,15	29,51
ST10_3.3	5,1	17,63	13,83	8,73	12,53	30,33
ST10_3.4	5,21	15,4	12,61	7,4	10,19	27,38
ST10_3.5	5,07	13,12	10,86	5,79	8,05	28,07
ST10_3.6	5,13	15,27	12,33	7,2	10,14	28,99
ST20_1.1	5,17	13,37	10,68	5,51	8,2	32,80
ST20_1.2	5,24	15,97	12,32	7,08	10,73	34,02
ST20_1.3	5,27	15,68	12,44	7,17	10,41	31,12
ST20_1.4	5,25	16,49	13,05	7,8	11,24	30,60
ST20_1.5	5,17	11,32	9,35	4,18	6,15	32,03
ST20_1.6	5,16	14,34	11,41	6,25	9,18	31,92
ST20_2.1	5,15	13,55	11,13	5,98	8,4	28,81
ST20_2.2	5,19	14,79	11,87	6,68	9,6	30,42
ST20_2.3	5,13	18,41	14,43	9,3	13,28	29,97
ST20_2.4	5,04	15,38	12,07	7,03	10,34	32,01
ST20_2.5	5,04	13,22	10,61	5,57	8,18	31,91
ST20_2.6	5,07	12,67	10,34	5,27	7,6	30,66
ST20_3.1	5,12	16,67	13,2	8,08	11,55	30,04
ST20_3.2	5,07	10,74	9,08	4,01	5,67	29,28
ST20_3.3	5,09	16,63	13,5	8,41	11,54	27,12
ST20_3.4	5,11	13,25	10,92	5,81	8,14	28,62
ST20_3.5	5,13	12,81	10,45	5,32	7,68	30,73
ST20_3.6	5,06	14,29	11,43	6,37	9,23	30,99
ST40_1.1	5,07	16,53	13,33	8,26	11,46	27,92
ST40_1.2	5,05	8,03	7,26	2,21	2,98	25,84
ST40_1.3	5,08	17,57	14,26	9,18	12,49	26,50
ST40_1.4	5,17	12,43	10,51	5,34	7,26	26,45
ST40_1.5	5,14	12,18	10,05	4,91	7,04	30,26
ST40_1.6	5,16	16,35	13,39	8,23	11,19	26,45
ST40_2.1	5,1	14,44	11,73	6,63	9,34	29,01
ST40_2.2	5,12	17,3	14,91	9,79	12,18	19,62
ST40_2.3	5,14	15,73	12,93	7,79	10,59	26,44
ST40_2.4	5,09	18,13	14,35	9,26	13,04	28,99
ST40_2.5	5,1	10,26	8,75	3,65	5,16	29,26
ST40_2.6	5,04	12,42	10,71	5,67	7,38	23,17
ST40_3.1	4,97	14,09	11,66	6,69	9,12	26,64
ST40_3.2	4,96	13,93	10,6	5,64	8,97	37,12
ST40_3.3	5,08	10,62	9,07	3,99	5,54	27,98
ST40_3.4	5,07	10,21	8,57	3,5	5,14	31,91
ST40_3.5	5,11	13,14	10,82	5,71	8,03	28,89
ST40_3.6	5,16	17,03	14,02	8,86	11,87	25,36

Tableau A-36 : Poids frais, sec des épillets et pourcentage d'humidité dans les épillets des plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻² de téphra au stade d'amorçage.

Test	Poid sachet (g)	Poid épillet frais (avec sachet) (g)	Poid épillet sec (avec sachet) (g)	Poid épillet frais (sans sachet) (g)	Poid épillet sec (sans sachet) (g)	Humidité épillet (%)
SPa0_5_1.1	5,09	12,53	10,33	5,24	7,44	29,57
SPa0_5_1.2	5,07	10,64	8,85	3,78	5,57	32,14
SPa0_5_1.3	5,18	14,53	11,61	6,43	9,35	31,23
SPa0_5_1.4	5,11	12,9	10,3	5,19	7,79	33,38
SPa0_5_1.5	5,13	13,03	10,84	5,71	7,9	27,72
SPa0_5_1.6	5,12	12,95	10,49	5,37	7,83	31,42
SPa0_5_2.1	5,09	10,76	9,15	4,06	5,67	28,40
SPa0_5_2.2	5,07	12,68	10,52	5,45	7,61	28,38
SPa0_5_2.3	5,1	15,42	12,84	7,74	10,32	25,00
SPa0_5_2.4	5,12	11,3	9,62	4,5	6,18	27,18
SPa0_5_2.5	5,09	13,81	11,07	5,98	8,72	31,42
SPa0_5_2.6	4,98	11,84	9,77	4,79	6,86	30,17
SPa0_5_3.1	5	13,71	11,36	6,36	8,71	26,98
SPa0_5_3.2	5,05	11,84	9,98	4,93	6,79	27,39
SPa0_5_3.3	5,03	12,96	10,94	5,91	7,93	25,47
SPa0_5_3.4	5,04	14,61	12,03	6,99	9,57	26,96
SPa0_5_3.5	5,11	15,65	12,77	7,66	10,54	27,32
SPa0_5_3.6	5,05	12,72	10,71	5,66	7,67	26,21
SPa5_1.1	5,06	13,47	11,35	6,29	8,41	25,21
SPa5_1.2	5,04	15,41	12,51	7,47	10,37	27,97
SPa5_1.3	5,05	17,67	14,64	9,59	12,62	24,01
SPa5_1.4	5,12	10,63	9,32	4,2	5,51	23,77
SPa5_1.5	5,13	10,82	9,35	4,22	5,69	25,83
SPa5_1.6	5,1	13,8	11,51	6,41	8,7	26,32
SPa5_2.1	5,11	12,04	10,48	5,37	6,93	22,51
SPa5_2.2	4,99	12,17	10,46	5,47	7,18	23,82
SPa5_2.3	4,98	13,68	11,59	6,61	8,7	24,02
SPa5_2.4	4,95	13,6	11,22	6,27	8,65	27,51
SPa5_2.5	4,95	11,18	9,56	4,61	6,23	26,00
SPa5_2.6	5,01	14,5	12,21	7,2	9,49	24,13
SPa5_3.1	4,95	14,25	11,78	6,83	9,3	26,56
SPa5_3.2	5,09	15,2	12,48	7,39	10,11	26,90
SPi5_3.3	5,09	13,84	11,49	6,4	8,75	26,86
SPi5_3.4	5,09	9,58	8,32	3,23	4,49	28,06
SPi5_3.5	5,07	12,34	10,48	5,41	7,27	25,58
SPa5_3.6	5,1	15	12,26	7,16	9,9	27,68
SPa10_1.1	5,02	11,36	9,32	4,3	6,34	32,18
SPa10_1.2	5,04	18,28	14,38	9,34	13,24	29,46
SPa10_1.5	5,03	12,4	9,98	4,95	7,37	32,84
SPa10_2.1	5,06	11,83	9,72	4,66	6,77	31,17
SPa10_2.2	5,08	11,95	9,79	4,71	6,87	31,44
SPa10_2.3	5,18	15,64	12,64	7,46	10,46	28,68
SPa10_2.4	5,16	11,15	9,2	4,04	5,99	32,55
SPa10_2.5	5,09	12,57	10,07	4,98	7,48	33,42
SPa10_2.6	5,07	12,47	10,37	5,3	7,4	28,38
SPa10_3.1	5,08	14,67	11,77	6,69	9,59	30,24
SPa10_3.2	5,08	11,29	9,37	4,29	6,21	30,92
SPa10_3.3	5,01	14,53	11,65	6,64	9,52	30,25
SPa10_3.4	5,1	11,62	9,68	4,58	6,52	29,75
SPa10_3.5	5,05	15,74	12,59	7,54	10,69	29,47
SPa10_3.6	5	13,39	10,98	5,98	8,39	28,72
SPa20_1.1	5,08	13,98	11,47	6,39	8,9	28,20
SPa20_1.2	5,14	11,18	9,53	4,39	6,04	27,32
SPa20_1.3	5,12	15,99	13,2	8,08	10,87	25,67
SPa20_1.4	5,219	13,81	11,49	6,271	8,591	27,01
SPa20_1.5	5,13	10,93	9,26	4,13	5,8	28,79
SPa20_1.6	5,12	15,53	12,55	7,43	10,41	28,63
SPa20_2.1	5,13	13,47	11,45	6,32	8,34	24,22
SPa20_2.2	5,03	12,67	10,62	5,59	7,64	26,83
SPa20_2.3	5,12	11,4	9,62	4,5	6,28	28,34
SPa20_2.4	5,15	12,46	10,58	5,43	7,31	25,72
SPa20_2.5	5,14	11,55	9,75	4,61	6,41	28,08
SPa20_2.6	5,05	14,4	11,98	6,93	9,35	25,88
SPa0_3.1	5,09	12,75	10,53	5,44	7,66	28,98
SPa20_3.2	5,18	8,6	7,46	2,28	3,42	33,33
SPa20_3.3	5,14	14,08	11,81	6,67	8,94	25,39
SPa20_3.4	5,15	13,33	11,14	5,99	8,18	26,77
SPa20_3.5	5,17	15,5	12,65	7,48	10,33	27,59
SPa20_3.6	5,04	13,13	11	5,96	8,09	26,33
SPa40_1.1	5,06	14,3	11,82	6,76	9,24	26,84
SPa40_1.2	5,03	12,21	10,11	5,08	7,18	29,25
SPa40_1.3	5,17	15,28	13,71	8,54	10,11	15,53
SPa40_1.4	5,25	12,11	10,47	5,22	6,86	23,91
SPa40_1.5	5,13	10,1	8,77	3,64	4,97	26,76
SPa40_1.6	5,1	11,33	9,59	4,49	6,23	27,93
SPa40_2.1	5,03	14,94	12,52	7,49	9,91	24,42
SPa40_2.2	5,01	10,67	9,11	4,1	5,66	27,56
SPa40_2.3	5,12	11,29	9,83	4,71	6,17	23,66
SPa40_2.4	5,12	14,29	11,92	6,8	9,17	25,85
SPa40_2.5	5,16	11,19	9,51	4,35	6,03	27,86
SPa40_2.6	5,04	14,19	11,92	6,88	9,15	24,81
SPa40_3.1	5,09	13,58	11,65	6,56	8,49	22,73
SPa40_3.2	5,09	10,3	8,96	3,87	5,21	25,72
SPa40_3.3	5,153	14,65	12,47	7,317	9,497	22,95
SPa40_3.4	5,49	13,67	11,75	6,26	8,18	23,47
SPa40_3.5	5,52	10,4	9,02	3,5	4,88	28,28
SPa40_3.6	5,41	15,81	13,4	7,99	10,4	23,17

Tableau A-37 : Poids frais, sec des épillets et pourcentage d'humidité dans les épillets des plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻² de téphra au stade de floraison.

Test	Poid sachet (g)	Poid épillet frais (avec sachet) (g)	Poid épillet sec (avec sachet) (g)	Poid épillet frais (sans sachet) (g)	Poid épillet sec (sans sachet) (g)	Humidité épillet (%)
SI0_5_1.1	5,51	10,09	8,72	3,21	4,58	29,91
SI0_5_1.2	5,53	13,14	10,9	5,37	7,61	29,43
SI0_5_1.3	5,47	12,46	10,4	4,93	6,99	29,47
SI0_5_1.4	5,4	12,9	10,73	5,33	7,5	28,93
SI0_5_1.5	5,5	10,82	9,24	3,74	5,32	29,70
SI0_5_1.6	5,5	13,75	11,45	5,95	8,25	27,88
SI0_5_2.1	5,47	14,85	11,84	6,37	9,38	32,09
SI0_5_2.2	5,33	16,4	13,05	7,72	11,07	30,26
SI0_5_2.3	5,27	12,74	10,38	5,11	7,47	31,59
SI0_5_2.4	5,33	14,95	12,03	6,7	9,62	30,35
SI0_5_2.5	5,33	8,45	7,43	2,1	3,12	32,69
SI0_5_2.6	5,29	11,94	9,78	4,49	6,65	32,48
SI0_5_3.1	5,35	6,49	6,12	0,77	1,14	32,46
SI0_5_3.2	5,4	12,38	10,15	4,75	6,98	31,95
SI0_5_3.3	5,31	11,25	9,36	4,05	5,94	31,82
SI0_5_3.4	5,24	15,36	12,19	6,95	10,12	31,32
SI0_5_3.5	5,32	12,87	10,33	5,01	7,55	33,64
SI0_5_3.6	5,29	12,19	9,92	4,63	6,9	32,90
SI5_1.3	5,37	7,4	6,73	1,36	2,03	33,00
SI5_1.6	5,34	9	7,84	2,5	3,66	31,69
SI5_3.1	5,39	11,19	9,43	4,04	5,8	30,34
SI5_3.2	5,4	11,4	9,53	4,13	6	31,17
SI5_3.3	5,38	14,64	12,05	6,67	9,26	27,97
SI5_3.4	5,4	11,54	9,55	4,15	6,14	32,41
SI5_3.5	5,38	12,19	10,12	4,74	6,81	30,40
SI5_3.6	5,35	20,84	16,45	11,1	15,49	28,34
SI10_1.1	5,34	10,83	9,5	4,16	5,49	24,23
SI10_1.2	5,38	11,59	9,74	4,36	6,21	29,79
SI10_1.3	5,39	16,17	13,29	7,9	10,78	26,72
SI10_1.4	5,38	12,74	10,73	5,35	7,36	27,31
SI10_1.5	5,42	13,06	11,12	5,7	7,64	25,39
SI10_1.6	5,43	18,14	15,21	9,78	12,71	23,05
SI10_2.2	5,44	14,78	12,13	6,69	9,34	28,37
SI10_2.3	5,39	19,49	15,79	10,4	14,1	26,24
SI10_2.6	5,53	22,34	17,43	11,9	16,81	29,21
SI10_3.1	5,39	11,8	9,96	4,57	6,41	28,71
SI10_3.2	5,36	14,23	11,9	6,54	8,87	26,27
SI10_3.3	5,37	14,15	12,74	7,37	8,78	16,06
SI10_3.4	5,37	13,31	11,49	6,12	7,94	22,92
SI10_3.5	5,29	14,52	12,36	7,07	9,23	23,40
SI10_3.6	5,35	15,78	13,52	8,17	10,43	21,67
SI20_1.1	5,48	10,71	9,85	4,37	5,23	16,44
SI20_1.2	5,39	17,57	14,59	9,2	12,18	24,47
SI20_1.3	5,3	16,89	14,56	9,26	11,59	20,10
SI20_1.4	5,24	13,26	11,05	5,81	8,02	27,56
SI20_1.5	5,26	11,8	10,16	4,9	6,54	25,08
SI20_1.6	5,22	15,43	12,88	7,66	10,21	24,98
SI20_2.1	5,27	12,45	10,21	4,94	7,18	31,20
SI20_2.2	5,29	12,14	10,16	4,87	6,85	28,91
SI20_2.3	5,37	15,02	12,48	7,11	9,65	26,32
SI20_2.4	5,32	12,34	10,25	4,93	7,02	29,77
SI20_2.5	5,25	13,57	11,11	5,86	8,32	29,57
SI20_2.6	5,31	11,85	10,07	4,76	6,54	27,22
SI20_3.1	5,28	11,46	9,65	4,37	6,18	29,29
SI20_3.2	5,29	8,97	7,8	2,51	3,68	31,79
SI20_3.3	5,3	14,51	11,93	6,63	9,21	28,01
SI20_3.4	5,27	13,7	11,09	5,82	8,43	30,96
SI20_3.5	5,25	10,68	9,11	3,86	5,43	28,91
SI20_3.6	5,21	20,06	16,2	10,99	14,85	25,99
SI40_1.1	5,16	13,85	11,46	6,3	8,69	27,50
SI40_1.2	5,2	16,72	13,62	8,42	11,52	26,91
SI40_1.3	5,26	17,04	14,02	8,76	11,78	25,64
SI40_1.4	5,26	11,65	9,96	4,7	6,39	26,45
SI40_1.5	5,22	10,78	9,18	3,96	5,56	28,78
SI40_1.6	5,21	8,5	7,71	2,5	3,29	24,01
SI40_2.1	5,17	14,73	12	6,83	9,56	28,56
SI40_2.2	5,2	14,02	11,38	6,18	8,82	29,93
SI40_2.3	5,26	16,29	13,09	7,83	11,03	29,01
SI40_2.4	5,23	11,63	9,8	4,57	6,4	28,59
SI40_2.5	5,21	12,91	10,51	5,3	7,7	31,17
SI40_2.6	5,12	8,13	7,22	2,1	3,01	30,23
SI40_3.1	5,09	13,59	11,3	6,21	8,5	26,94
SI40_3.2	5,14	12,9	10,6	5,46	7,76	29,64
SI40_3.3	5,18	19,33	15,28	10,1	14,15	28,62
SI40_3.4	5,24	11,91	10,01	4,77	6,67	28,49
SI40_3.5	5,3	14,16	11,44	6,14	8,86	30,70
SI40_3.6	5,13	12,96	10,72	5,59	7,83	28,61

Tableau A-38 : Résultats du test de Dunnett pour le poids sec des épillets aux stades plantule, stade tallage, stade paniculaire, et stade de floraison après traitement avec différentes charges de masse de téphra. meandiff: différence moyenne entre les plantes traitées aux cendres et les plantes témoins; lower : limites inférieures de l'intervalle de confiance à 95% de la différence moyenne; upper : limites supérieures de l'intervalle de confiance à 95% de la différence moyenne; p-valeur : statistique de l'essai.

growth stage	ash mass load (kg m-2)	meandiff	p-adj	lower	upper	reject
Stade plantule	0,5	-0.4081	1.0	-2.7871	1.971	*
	5	-4.7213	0.0	-7.5275	-1.9152	
	10	-1.7105	0.6761	-4.2623	0.8413	
	20	-2.36	0.0875	-4.8475	0.1274	
	40	-0.932	0.9977	-3.265	1.401	
Stade tallage	0,5	-0.5666	1.0	-2.8578	1.7247	
	5	-0.8757	0.9995	-3.3059	1.5546	
	10	-0.6016	1.0	-2.8928	1.6897	
	20	-0.9688	0.9953	-3.26	1.3225	
	40	-0.9404	0.9968	-3.2317	1.3508	
Stade paniculaire	0,5	-0.1871	1.0	-2.4783	2.1041	
	5	-0.6527	1.0	-2.9439	1.6386	
	10	-0.2317	1.0	-2.6619	2.1986	
	20	-0.306	1.0	-2.5972	1.9852	
	40	-0.2877	1.0	-2.5789	2.0036	
Stade de floraison	0,5	0.6223	1.0	-1.6689	2.9136	
	5	1.5523	0.8578	-1.0726	4.1773	
	10	-1.515	0.7924	-3.9452	0.9152	
	20	-0.6872	0.9999	-2.8738	1.4994	
	40	-0.4077	1.0	-2.6989	1.8836	

Tableau A-39 : Poids frais, sec et pourcentage d'humidité dans les feuilles et tiges des plantes témoins.

Test	Poid sachet (g)	Poids tiges/feuilles frais (avec sachet) (g)	Poids tiges/feuilles sec (avec sachet) (g)	Poids tiges/feuilles frais (sans sachet) (g)	Poids tiges/feuilles sec (sans sachet) (g)	Humidité (%)
TIR29 1.1	5,3	50,88	14,91	9,61	45,58	78,92
TIR29 1.4	5,24	40,88	12,64	7,4	35,64	79,24
TIR29 1.6	5,24	53,13	16,02	10,78	47,89	77,49
TIR29 2.1	5,17	40,34	14,25	9,08	35,17	74,18
TIR29 2.2	5,26	42,8	15,38	10,12	37,54	73,04
TIR29 2.3	5,2	71,39	22,41	17,21	66,19	74,00
TIR29 2.4	5,14	37,19	13,61	8,47	32,05	73,57
TIR29 2.5	5,16	42,1	14,52	9,36	36,94	74,66
TIR29 2.6	5,11	56,32	18,52	13,41	51,21	73,81
TIR29 3.1	5,09	42,38	14,22	9,13	37,29	75,52
TIR29 3.2	5,09	42,27	14,37	9,28	37,18	75,04
TIR29 3.3	5,15	65,06	20,74	15,59	59,91	73,98
TIR29 3.4	5,09	55,28	17,77	12,68	50,19	74,74
TIR29 3.5	5,08	52,11	17,62	12,54	47,03	73,34
TIR29 3.6	5,02	83,63	26,05	21,03	78,61	73,25
TIR29 4.1	5,02	38,5	13,29	8,27	33,48	75,30
TIR29 4.2	5,1	48,74	15,87	10,77	43,64	75,32
TIR29 4.3	5,17	70,26	20,97	15,8	65,09	75,73
TIR29 4.4	5,07	36,34	12,8	7,73	31,27	75,28
TIR29 4.5	5,09	50,99	16,27	11,18	45,9	75,64
TIR29 4.6	5,05	75,69	23,55	18,5	70,64	73,81
TIR29 5.1	5,13	48,65	16,2	11,07	43,52	74,56
TIR29 5.2	5,25	38,02	12,86	7,61	32,77	76,78
TIR29 5.3	5,11	55,24	17,8	12,69	50,13	74,69
TIR29 5.4	5,06	31,64	11,45	6,39	26,58	75,96
TIR29 5.5	5,09	52,15	17,14	12,05	47,06	74,39
TIR29 5.6	5,09	37,42	12,95	7,86	32,33	75,69
TIR29 6.1	5,13	32,47	11,4	6,27	27,34	77,07
TIR29 6.2	5,36	33,9	11,68	6,32	28,54	77,86
TIR29 6.3		85,24	25,71	25,71	85,24	69,84

Tableau A-40 : Poids frais, sec et pourcentage d'humidité dans les feuilles et tiges des plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻² de téphra au stade plantule.

Test	Poid sachet (g)	Poids tiges/feuilles frais (avec sachet) (g)	Poids tiges/feuilles sec (avec sachet) (g)	Poids tiges/feuilles frais (sans sachet) (g)	Poids tiges/feuilles sec (sans sachet) (g)	Humidité (%)
SPI0_5_1.1	5,11	54,34	17,75	12,64	49,23	74,32
SPI0_5_1.2	5,1	52,32	17,8	12,7	47,22	73,10
SPI0_5_1.3	5,14	50,11	17,33	12,19	44,97	72,89
SPI0_5_1.5	5,14	33,38	12,48	7,34	28,24	74,01
SPI0_5_1.6	5,24	67,5	22,21	16,97	62,26	72,74
SPI0_5_2.2	5,1	51,31	17,25	12,15	46,21	73,71
SPI0_5_2.3	5,03	67,37	22,41	17,38	62,34	72,12
SPI0_5_2.4	5,09	70,28	22,73	17,64	65,19	72,94
SPI0_5_2.5	5,2	41,92	15,84	10,64	36,72	71,02
SPI0_5_2.6	5,27	59,77	20,42	15,15	54,5	72,20
SPI0_5_3.1	5,24	39,89	15,42	10,18	34,65	70,62
SPI0_5_3.2	5,25	34,03	13,42	8,17	28,78	71,61
SPI0_5_3.3	5,24	37,48	15,18	9,94	32,24	69,17
SPI0_5_3.4	5,25	47,65	17,66	12,41	42,4	70,73
SPI0_5_3.5	5,29	48,79	17,87	12,58	43,5	71,08
SPI0_5_3.6	5,25	36,37	15,81	10,56	31,12	66,07
SPI5_1.1	5,32	68,95	23,49	18,17	63,63	71,44
SPI5_1.3	5,46	104,33	33,16	27,7	98,87	71,98
SPI5_1.4	5,4	38,83	14,96	9,56	33,43	71,40
SPI5_1.5	5,43	64,37	22,25	16,82	58,94	71,46
SPI5_2.2	5,48	119,58	34,71	29,23	114,1	74,38
SPI5_2.4	5,51	68,17	22,19	16,68	62,66	73,38
SPI5_3.1	5,48	51,09	18,62	13,14	45,61	71,19
SPI5_3.2	5,44	80,82	25,61	20,17	75,38	73,24
SPI5_3.4	5,4	58,75	21,94	16,54	53,35	69,00
SPI5_3.5	5,44	63,11	23,5	18,06	57,67	68,68
SPI10_1.1	5,51	58,34	20,61	15,1	52,83	71,42
SPI10_1.2	5,53	42,98	16,5	10,97	37,45	70,71
SPI10_1.3	5,47	47,02	18,11	12,64	41,55	69,58
SPI10_1.4	5,5	52,23	19,8	14,3	46,73	69,40
SPI10_1.6	5,46	82,6	27,35	21,89	77,14	71,62
SPI10_2.4	5,38	77,31	25,08	19,7	71,93	72,61
SPI10_2.6	5,48	98,85	30,22	24,74	93,37	73,50
SPI10_3.1	5,41	41,44	15,98	10,57	36,03	70,66
SPI10_3.2	5,4	60,59	21,67	16,27	55,19	70,52
SPI10_3.3	5,45	45,56	18,47	13,02	40,11	67,54
SPI10_3.4	5,44	52,17	19,62	14,18	46,73	69,66
SPI10_3.5	5,45	37,09	15,01	9,56	31,64	69,79
SPI10_3.6	5,42	53,39	20,62	15,2	47,97	68,31
SPI20_1.1	5,43	59,79	21,45	16,02	54,36	70,53
SPI20_1.2	5,4	40,47	16,41	11,01	35,07	68,61
SPI20_1.3	5,43	65,87	24,57	19,14	60,44	68,33
SPI20_1.5	5,42	49,78	17,88	12,46	44,36	71,91
SPI20_1.6	5,39	56,01	20,13	14,74	50,62	70,88
SPI20_2.1	5,32	76,24	24,58	19,26	70,92	72,84
SPI20_2.3	5,39	54,85	20,24	14,85	49,46	69,98
SPI20_2.4	5,35	71,04	24,22	18,87	65,69	71,27
SPI20_2.5	5,34	46,1	18,43	13,09	40,76	67,89
SPI20_2.6	5,3	47,49	18,63	13,33	42,19	68,40
SPI20_3.1	5,33	65,18	23	17,67	59,85	70,48
SPI20_3.2	5,4	41,65	15,59	10,19	36,25	71,89
SPI20_3.3	5,33	41,22	17	11,67	35,89	67,48
SPI20_3.5	5,29	35,95	15,59	10,3	30,66	66,41
SPI20_3.6	5,33	78,25	28,55	23,22	72,92	68,16
SPI40_1.1	5,33	40,75	15,97	10,64	35,42	69,96
SPI40_1.2	5,35	40,81	15,98	10,63	35,46	70,02
SPI40_1.3	5,36	63,74	21,77	16,41	58,38	71,89
SPI40_1.4	5,38	59,57	20,04	14,66	54,19	72,95
SPI40_1.5	5,21	59,81	19,5	14,29	54,6	73,83
SPI40_1.6	5,25	29,91	12,3	7,05	24,66	71,41
SPI40_2.1	5,24	81,13	24,81	19,57	75,89	74,21
SPI40_2.2	5,28	62,26	20,54	15,26	56,98	73,22
SPI40_2.3	5,3	31,96	12,68	7,38	26,66	72,32
SPI40_2.4	5,32	61,36	20,27	14,95	56,04	73,32
SPI40_2.5	5,27	42,8	15,67	10,4	37,53	72,29
SPI40_3.1	5,29	44,24	16,71	11,42	38,95	70,68
SPI40_3.2	5,28	55,94	19,63	14,35	50,66	71,67
SPI40_3.3	5,19	60,89	21,95	16,76	55,7	69,91
SPI40_3.4	5,28	38,38	15,24	9,96	33,1	69,91
SPI40_3.5	5,18	53,5	20,04	14,86	48,32	69,25
SPI40_3.6	5,19	46,43	17,84	12,65	41,24	69,33

Tableau A-41 : Poids frais, sec et pourcentage d'humidité dans les feuilles et tiges des plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m-2 de téphra au stade tallage.

Test	Poid sachet (g)	Poids tiges/feuilles frais (avec sachet) (g)	Poids tiges/feuilles sec (avec sachet) (g)	Poids tiges/feuilles frais (sans sachet) (g)	Poids tiges/feuilles sec (sans sachet) (g)	Humidité (%)
ST0.5_1.1	5,21	62,98	20,44	15,23	57,77	73,64
ST0.5_1.2	5,12	14,64	7,72	2,6	9,52	72,69
ST0.5_1.3	5,21	62,23	19,81	14,6	57,02	74,39
ST0.5_1.4	5,22	65,4	20,31	15,09	60,18	74,93
ST0.5_1.5	5,25	45,53	15,43	10,18	40,28	74,73
ST0.5_1.6	5,19	54,73	17,23	12,04	49,54	75,70
ST0.5_2.1	5,15	38,84	13,29	8,14	33,69	75,84
ST0.5_2.2	5,19	54,36	17,48	12,29	49,17	75,01
ST0.5_2.3	5,28	52,45	17,65	12,37	47,17	73,78
ST0.5_2.4	5,3	65,14	20,86	15,56	59,84	74,00
ST0.5_2.5	5,25	42,58	14,55	9,3	37,33	75,09
ST0.5_2.6	5,2	49,56	17,11	11,91	44,36	73,15
ST0.5_3.1	5,19	58,42	19,26	14,07	53,23	73,57
ST0.5_3.2	5,25	29,49	11,75	6,5	24,24	73,18
ST0.5_3.3	5,11	46,14	15,97	10,86	41,03	73,53
ST0.5_3.4	5,11	74,87	23,8	18,69	69,76	73,21
ST0.5_3.5	5,18	55,36	19,38	14,2	50,18	71,70
ST0.5_3.6	5,19	45,07	16,62	11,43	39,88	71,34
ST5_1.1 V	5,2	106,89	32,33	27,13	101,69	73,32
ST5_1.2	5,12	60,58	21,13	16,01	55,46	71,13
ST5_1.5	5,23	60,01	19,56	14,33	54,78	73,84
ST5_2.1	5,2	70,09	23,12	17,92	64,89	72,38
ST5_2.2	5,12	50,43	16,7	11,58	45,31	74,44
ST5_2.3	5,12	48,72	16,96	11,84	43,6	72,84
ST5_2.4	5,19	49,43	17,05	11,86	44,24	73,19
ST5_2.5	5,17	63,99	21	15,83	58,82	73,09
ST5_2.6	5,19	46,95	16,53	11,34	41,76	72,84
ST5_3.1	5,26	35,31	13,99	8,73	30,05	70,95
ST5_3.2	5,16	56,23	18,61	13,45	51,07	73,66
ST5_3.3	5,21	46,08	17,75	12,54	40,87	69,32
ST5_3.4	5,23	59,8	20,64	15,41	54,57	71,76
ST5_3.5	5,12	46,09	16,37	11,25	40,97	72,54
ST5_3.6	5,38	48,76	17,66	12,28	43,38	71,69
ST10_1.1	5,22	68,36	23,3	18,08	63,14	71,37
ST10_1.2	5,16	41,4	15,64	10,48	36,24	71,08
ST10_1.3	5,19	54,08	19,25	14,06	48,89	71,24
ST10_1.4	5,15	40,28	15,05	9,9	35,13	71,82
ST10_1.5	5,19	23,34	10,31	5,12	18,15	71,79
ST10_1.6	5,14	59,21	19,71	14,57	54,07	73,05
ST10_2.1	5,1	51,8	17,57	12,47	46,7	73,30
SP110_2.2	5,08	46,53	16,27	11,19	41,45	73,00
ST10_2.3	5,07	52,9	18,03	12,96	47,83	72,90
ST10_2.4	5,16	70,05	23,36	18,2	64,89	71,95
ST10_2.5	5,26	48,38	17,18	11,92	43,12	72,36
ST10_2.6	5,17	35,81	13,61	8,44	30,64	72,45
ST10_3.1	5,14	56,29	19,22	14,08	51,15	72,47
ST10_3.2	5,19	45,66	16,4	11,21	40,47	72,30
ST10_3.3	5,15	71,22	23,42	18,27	66,07	72,35
ST10_3.4	4,16	60,3	20,95	16,79	56,14	70,09
ST10_3.5	5,16	49,6	17,74	12,58	44,44	71,69
ST10_3.6	5,15	60,42	21,11	15,96	55,27	71,12
ST20_1.1	5,25	42,36	14,83	9,58	37,11	74,18
ST20_1.2	5,22	53,23	18,49	13,27	48,01	72,36
ST20_1.3	5,26	54,51	19,25	13,99	49,25	71,59
ST20_1.4	5,25	49,5	17,18	11,93	44,25	73,04
ST20_1.5	5,12	35,27	12,91	7,79	30,15	74,16
ST20_1.6	5,19	48,79	17,45	12,26	43,6	71,88
ST20_2.1	5,11	43,85	15,61	10,5	38,74	72,90
ST20_2.2	5,108	47,14	15,2	10,092	42,032	75,99
ST20_2.3	5,1	60,01	19,7	14,6	54,91	73,41
ST20_2.4	5,07	44,86	16,23	11,16	39,79	71,95
ST20_2.5	5,11	43,95	15,28	10,17	38,84	73,82
ST20_2.6	5,1	35,1	13,27	8,17	30	72,77
ST20_3.1	5,04	54,13	18,92	13,88	49,09	71,73
ST20_3.2	5,1	28,99	11,55	6,45	23,89	73,00
ST20_3.3	5,07	56,11	19,9	14,83	51,04	70,94
ST20_3.4	5,15	41,48	16,25	11,1	36,33	69,45
ST20_3.5	5,11	41,05	14,97	9,86	35,94	72,57
ST20_3.6	5,07	42,2	17,3	12,23	37,13	67,06
ST40_1.1	5,07	55,45	19,22	14,15	50,38	71,91
ST40_1.2	5,06	31,56	13,44	8,38	26,5	68,38
ST40_1.3	5,14	61,03	21,45	16,31	55,89	70,82
ST40_1.4	5,1	41,35	14,94	9,84	36,25	72,86
ST40_1.5	5,16	44,39	15,83	10,67	39,23	72,80
ST40_1.6	5,06	54,65	19,2	14,14	49,59	71,49
ST40_2.1	5,11	51,22	17,55	12,44	46,11	73,02
ST40_2.2	5,1	63,24	20,87	15,77	58,14	72,88
ST40_2.3	5,11	53,78	17,96	12,85	48,67	73,60
ST40_2.4	5,14	72,12	22,48	17,34	66,98	74,11
ST40_2.5	5,05	34,46	12,72	7,67	29,41	73,92
ST40_2.6	5,04	39,26	14,79	9,75	34,22	71,51
ST40_3.1	5,02	55,05	18,62	13,6	50,03	72,82
ST40_3.2	5,05	42,58	15,16	10,11	37,53	73,06
ST40_3.3	5,13	35,68	13,89	8,76	30,55	71,33
ST40_3.4	5,13	32,5	12,89	7,76	27,37	71,65
ST40_3.5	5,1	49,19	17,27	12,17	44,09	72,40
ST40_3.6	5,12	65,65	23,08	17,96	60,53	70,33

TableauA-42 : Poids frais, sec et pourcentage d'humidité dans les feuilles et tiges des plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m-2 de téphra au stade d'amorçage.

Test	Poid sachet (g)	Poids tiges/feuilles frais (avec sachet) (g)	Poids tiges/feuilles sec (avec sachet) (g)	Poids tiges/feuilles frais (sans sachet) (g)	Poids tiges/feuilles sec (sans sachet) (g)	Humidité (%)
SPa0_5_1.1	5,06	42,31	14,04	8,98	37,25	75,89
SPa0_5_1.2	5,14	40,16	13,25	8,11	35,02	76,84
SPa0_5_1.3	5,13	65,07	19,25	14,12	59,94	76,44
SPa0_5_1.4	5,16	49,08	14,94	9,78	43,92	77,73
SPa0_5_1.5	5,16	54,24	16,55	11,39	49,08	76,79
SPa0_5_1.6	5,13	59,55	17,73	12,6	54,42	76,85
SPa0_5_2.1	5,11	46,46	15,02	9,91	41,35	76,03
SPa0_5_2.2	5,04	54,93	15,92	10,88	49,89	78,19
SPa0_5_2.3	5,07	72,26	20,46	15,39	67,19	77,09
SPa0_5_2.4	5,08	40,78	13,51	8,43	35,7	76,39
SPa0_5_2.5	5,08	60,88	17,8	12,72	55,8	77,20
SPa0_5_2.6	4,96	74,96	22,16	17,2	70	75,43
SPa0_5_3.1	4,96	47,77	15,4	10,44	42,81	75,61
SPa0_5_3.2	5	42,88	13,9	8,9	37,88	76,50
SPa0_5_3.3	5,03	52,26	16,74	11,71	47,23	75,21
SPa0_5_3.4	5,08	59,62	18,88	13,8	54,54	74,70
SPa0_5_3.5	5,08	75,86	22,2	17,12	70,78	75,81
SPa0_5_3.6	5,05	59,02	18,26	13,21	53,97	75,52
SPa5_1.1	5,03	51,7	18,27	13,24	46,67	71,63
SPa5_1.2	5,06	61,23	19,53	14,47	56,17	74,24
SPa5_1.3	5,08	75,18	24,41	19,33	70,1	72,43
SPa5_1.4	5,18	39,011	14,61	9,43	33,831	72,13
SPa5_1.5	5,17	33,48	12,76	7,59	28,31	73,19
SPa5_1.6	5,13	49,44	16,88	11,75	44,31	73,48
SPa5_2.1	5,1	51,79	17,93	12,83	46,69	72,52
SPa5_2.2	5,07	42,87	15,29	10,22	37,8	72,96
SPa5_2.3	4,97	53,61	18,2	13,23	48,64	72,80
SPa5_2.4	4,96	57,94	18,76	13,8	52,98	73,95
SPa5_2.5	4,94	48,78	16,08	11,14	43,84	74,59
SPa5_2.6	5,97	52,55	18,21	12,24	46,58	73,72
SPa5_3.1	5,03	55,75	18,5	13,47	50,72	73,44
SPa5_3.2	5,07	51,85	16,78	11,71	46,78	74,97
SPa5_3.3	5,11	51,4	17,74	12,63	46,29	72,72
SPa5_3.4	5	31,43	12,27	7,27	26,43	72,49
SPa5_3.5	5,01	52,18	16,67	11,66	47,17	75,28
SPa5_3.6	5,08	58,88	19,36	14,28	53,8	73,46
SPa10_1.1	5,06	44,97	15,6	10,54	39,91	73,59
SPa10_1.2	5,07	86,78	25,21	20,14	81,71	75,35
SPa10_1.4	5,92	52,12	17,26	11,34	46,2	75,45
SPa10_1.5	4,99	38,89	14,41	9,42	33,9	72,21
SPa10_1.6	5	42,3	14,98	9,98	37,3	73,24
SPa10_2.1	5,05	50,98	17,66	12,61	45,93	72,55
SPa10_2.2	5,18	41,05	14,6	9,42	35,87	73,74
SPa10_2.3	5,14	67,31	22,22	17,08	62,17	72,53
SPa10_2.4	5,11	35,6	13,95	8,84	30,49	71,01
SPa10_2.5	5,05	49,06	16,01	10,96	44,01	75,10
SPa10_2.6	5,1	53,41	18,34	13,24	48,31	72,59
SPa10_3.1	5,09	53,64	18,03	12,94	48,55	73,35
SPa10_3.2	5,3	42,26	14,74	9,44	36,96	74,46
SPa10_3.3	5,04	61,53	19,68	14,64	56,49	74,08
SPa10_3.4	5,1	47,72	16,83	11,73	42,62	72,48
SPa10_3.5	5,03	54,07	18,06	13,03	49,04	73,43
SPa10_3.6	5,07	42,9	15,89	10,82	37,83	71,40
SPa20_1.1	5,09	52,62	17,95	12,86	47,53	72,94
SPa20_1.2	5,11	38,94	14,16	9,05	33,83	73,25
SPa20_1.3	5,19	63,71	20,51	15,32	58,52	73,82
SPa20_1.4	5,15	56,78	18,92	13,77	51,63	73,33
SPa20_1.5	5,1	37,28	14,18	9,08	32,18	71,78
SPa20_1.6	5,19	60,54	19,48	14,29	55,35	74,18
SPa20_2.1	5,22	57,66	18,37	13,15	52,44	74,92
SPa20_2.2	5,05	56,02	19,81	14,76	50,97	71,04
SPa20_2.3	5,12	41,09	14,21	9,09	35,97	74,73
SPa20_2.4	5,15	47,83	16,23	11,08	42,68	74,04
SPa20_2.5	5,09	43,7	14,9	9,81	38,61	74,59
SPa20_2.6	5,09	56,4	18,15	13,06	51,31	74,55
SPa20_3.1	5,16	47,36	16,87	11,71	42,2	72,25
SPa20_3.2	5,14	29,49	12,27	7,13	24,35	70,72
SPa20_3.3	5,2	53,69	18,28	13,08	48,49	73,03
SPa20_3.4	5,18	47,96	16,79	11,61	42,78	72,86
SPa20_3.5	5,11	61,94	20,07	14,96	56,83	73,68
SPa20_3.6	5,11	58,1	20,25	15,14	52,99	71,43
SPa40_1.1	5,16	56,99	19,4	14,24	51,83	72,53
SPa40_1.2	5,08	42,14	15,11	10,03	37,06	72,94
SPa40_1.3	5,19	62,52	22,47	17,28	57,33	69,86
SPa40_1.4	5,15	36,55	14,37	9,22	31,4	70,64
SPa40_1.5	5,09	32,81	12,62	7,53	27,72	72,84
SPa40_1.6	5,03	34,34	13,59	8,56	29,31	70,79
SPa40_2.1	5,03	56,67	18,99	13,96	51,64	72,97
SPa40_2.2	4,99	36,09	13,72	8,73	31,1	71,93
SPa40_2.3	5,04	39,19	14,55	9,51	34,15	72,15
SPa40_2.4	5,12	55,91	17,93	12,81	50,79	74,78
SPa40_2.5	5,11	33,24	12,66	7,55	28,13	73,16
SPa40_2.6	5,07	51,19	17,9	12,83	46,12	72,18
SPa40_3.1	5,09	48,55	17,29	12,2	43,46	71,93
SPa40_3.2	5,11	37,08	13,62	8,51	31,97	73,38
SPa40_3.3	5,14	60,29	20,38	15,24	55,15	72,37
SPa40_3.4	5,51	45,64	17,97	12,46	40,13	68,95
SPa40_3.5	5,44	36,6	14,37	8,93	31,16	71,34
SPa40_3.6	5,6	61,34	19,86	14,26	55,74	74,42

Tableau A-43 : Poids frais, sec et pourcentage d'humidité dans les feuilles et tiges des plantes ayant reçu 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻² de téphra au stade de floraison.

Test	Poid sachet (g)	Poids tiges/feuilles frais (avec sachet) (g)	Poids tiges/feuilles sec (avec sachet) (g)	Poids tiges/feuilles frais (sans sachet) (g)	Poids tiges/feuilles sec (sans sachet) (g)	Humidité (%)
SL0_5_1.1	5,48	25,89	10,43	4,95	20,41	75,75
SL0_5_1.2	5,45	40,92	13,98	8,53	35,47	75,95
SL0_5_1.3	5,37	48,25	15,42	10,05	42,88	76,56
SL0_5_1.4	5,45	45,45	15,36	9,91	40	75,23
SL0_5_1.5	5,58	26,74	11,93	6,35	21,16	69,99
SL0_5_1.6	5,47	46,51	14,95	9,48	41,04	76,90
SL0_5_2.1	5,41	54,27	16,43	11,02	48,86	77,45
SL0_5_2.2	5,36	57,1	16,27	10,91	51,74	78,91
SL0_5_2.3	5,24	52,41	15,48	10,24	47,17	78,29
SL0_5_2.4	5,37	58,85	17,25	11,88	53,48	77,79
SL0_5_2.5	5,329	18,48	8,48	3,151	13,151	76,04
SL0_5_2.6	5,33	47,83	14,98	9,65	42,5	77,29
SL0_5_3.1	5,31	10,71	6,88	1,57	5,4	70,93
SL0_5_3.2	5,32	49,31	15,18	9,86	43,99	77,59
SL0_5_3.3	5,38	36,32	12,75	7,37	30,94	76,18
SL0_5_3.4	5,28	64,4	18,41	13,13	59,12	77,79
SL0_5_3.5	5,28	57,4	17,96	12,68	52,12	75,67
SL0_5_3.6	5,38	48,1	15,94	10,56	42,72	75,28
SL5_1.1	5,35	28,87	12,26	6,91	23,52	70,62
SL5_1.2	5,32	25,9	10,98	5,66	20,58	72,50
SL5_1.3	5,38	32,68	12,48	7,1	27,3	73,99
SL5_1.5	5,36	21,87	9,87	4,51	16,51	72,68
SL5_1.6	5,35	29,36	11,75	6,4	24,01	73,34
SL5_2.1	5,35	20,96	9,54	4,19	15,61	73,16
SL5_2.2	5,38	35,36	13,25	7,87	29,98	73,75
SL5_2.3	5,41	64,02	20,59	15,18	58,61	74,10
SL5_2.4	5,49	16,01	8,37	2,88	10,52	72,62
SL5_2.5	5,39	32,68	12,23	6,84	27,29	74,94
SL5_3.1	5,38	38,41	14,19	8,81	33,03	73,33
SL5_3.2	5,39	39,25	14,09	8,7	33,86	74,31
SL5_3.3	5,36	49,8	16,67	11,31	44,44	74,55
SL5_3.4	5,42	37,65	14,49	9,07	32,23	71,86
SL5_3.5	5,38	33,44	13,01	7,63	28,06	72,81
SL5_3.6	3,33	72,82	23,71	20,38	69,49	70,67
SL10_1.1	5,37	37,88	13,82	8,45	32,51	74,01
SL10_1.2	5,43	47,63	16,82	11,39	42,2	73,01
SL10_1.3	5,36	70,5	23,21	17,85	65,14	72,60
SL10_1.4	5,42	41,18	15,13	9,71	35,76	72,85
SL10_1.5	5,47	48,77	17,3	11,83	43,3	72,68
SL10_1.6	5,4	71,84	23,82	18,42	66,44	72,28
SL10_2.2	5,44	41,14	15,72	10,28	35,7	71,20
SL10_2.3	5,41	72,29	24,01	18,6	66,88	72,19
SL10_2.6	5,44	60,57	21,11	15,67	55,13	71,58
SL10_3.1	5,43	32,76	12,63	7,2	27,33	73,66
SL10_3.2	5,38	52,3	17,61	12,23	46,92	73,93
SL10_3.3	5,42	50,28	18,23	12,81	44,86	71,44
SL10_3.4	5,35	36,01	15,01	9,66	30,66	68,49
SL10_3.5	5,33	48,85	11,62	16,95	43,52	73,30
SL10_3.6	5,32	56,93	19,88	14,56	51,61	71,79
SL20_1.1	5,51	30,76	12,52	7,01	25,25	72,24
SL20_1.2	5,39	52,95	14,15	47,56	70,25	
SL20_1.3	5,33	64,78	21,71	16,38	59,45	72,45
SL20_1.4	5,26	31,71	13,65	8,39	26,45	68,28
SL20_1.5	5,18	33,76	13,09	7,91	28,58	72,32
SL20_1.6	5,28	49,21	18,72	13,44	43,93	69,41
SL20_2.1	5,25	26,23	12,5	7,25	20,98	65,44
SL20_2.2	5,39	32,27	13,03	7,64	26,88	71,58
SL20_2.3	5,32	66,21	21,64	16,32	60,89	73,20
SL20_2.4	5,29	42,93	15,22	9,93	37,64	73,62
SL20_2.5	5,23	41,31	14,12	8,89	36,08	75,36
SL20_2.6	5,32	37,52	14,45	9,13	32,2	71,65
SL20_3.1	5,23	24,14	11,35	6,12	18,91	67,64
SL20_3.2	5,32	16,67	9,01	3,69	11,35	67,49
SL20_3.3	5,34	41,02	15,96	10,62	35,68	70,24
SL20_3.4	5,27	42,09	14,88	9,61	36,82	73,90
SL20_3.5	5,27	22,72	10,97	5,7	17,45	67,34
SL20_3.6	5,24	55,19	21,02	15,78	49,95	68,41
SL40_1.1	5,19	43,69	15,39	10,2	38,5	73,51
SL40_1.2	5,2	73,49	22,94	17,74	68,29	74,02
SL40_1.3	5,24	56,84	18,62	13,38	51,6	74,07
SL40_1.4	5,23	41,28	14,98	9,75	36,05	72,95
SL40_1.5	5,23	27,27	11,26	6,03	22,04	72,64
SL40_1.6	5,13	21,51	9,74	4,61	16,38	71,86
SL40_2.1	5,14	35,65	14,52	9,38	30,51	69,26
SL40_2.2	5,2	43,61	14,65	9,45	38,41	75,40
SL40_2.3	5,25	52,89	17,6	12,35	47,64	74,08
SL40_2.4	5,27	28,99	12,74	7,47	23,72	68,51
SL40_2.5	5,18	36,77	13,74	8,56	31,59	72,90
SL40_3.1	5,11	44,51	15,23	10,12	39,4	74,31
SL40_3.4	5,22	34,75	12,63	7,41	29,53	74,91
SL40_3.5	5,32	40,91	14,43	9,11	35,59	74,40
SL40_3.6	5,26	35,74	13,98	8,72	30,48	71,39

Tableau A-44: Résultats du test de Dunnett pour le poids des feuilles et tiges aux stades plantule, stade tallage, stade paniculaire, et stade de floraison après traitement avec différentes charges de masse de téphra. meandiff: différence moyenne entre les plantes traitées aux cendres et les plantes témoins; lower : limites inférieures de l'intervalle de confiance à 95% de la différence moyenne; upper : limites supérieures de l'intervalle de confiance à 95% de la différence moyenne; p-valeur : statistique de l'essai.

growth stage	ash mass load (kg m-2)	meandiff	p-adj	lower	upper	reject
Stade plantule	0,5	1.0502	1.0	-14.0608	16.1612	
	5	-20.9657	0.0051	-38.7896	-3.1417	**
	10	-6.8071	0.9957	-23.0153	9.4012	
	20	-4.5643	1.0	-20.0003	10.8716	
	40	-0.7064	1.0	-15.5247	14.1119	
Stade tallage	0,5	-0.39	1.0	-14.9432	14.1632	
	5	-6.0323	0.9983	-21.4683	9.4036	
	10	-1.4789	1.0	-16.0321	13.0743	
	20	4.8371	0.9998	-9.7161	19.3903	
	40	1.4278	1.0	-13.1254	15.981	
Stade paniculaire	0,5	-4.9778	0.9997	-19.531	9.5754	
	5	-0.5523	1.0	-15.1055	14.0009	
	10	-0.3246	1.0	-15.1429	14.4937	
	20	-0.0828	1.0	-14.636	14.4704	
	40	4.61	0.9999	-9.9432	19.1632	
Stade de floraison	0,5	6.9455	0.9807	-7.6077	21.4987	
	5	14.4583	0.0805	-0.6526	29.5693	
	10	-0.4657	1.0	-15.9016	14.9703	
	20	11.1733	0.4082	-3.3799	25.7265	
	40	9.4163	0.8214	-6.0196	24.8523	

Tableau A-45 : Résultats du test de Dunnett du taux d'humidité des feuilles et tiges aux stades plantule, stade tallage, stade paniculaire, et stade de floraison après traitement avec différentes charges de masse de téphra. meandiff: différence moyenne entre les plantes traitées aux cendres et les plantes témoins; lower : limites inférieures de l'intervalle de confiance à 95% de la différence moyenne; upper : limites supérieures de l'intervalle de confiance à 95% de la différence moyenne; p-valeur : statistique de l'essai.

growth stage	ash mass load (kg m-2)	meandiff	p-adj	lower	upper	reject
Stade plantule	0,5	3.3194	0.0	1.5132	5.1256	***
	5	3.475	0.0	1.3445	5.6055	***
	10	4.6808	-0.0	2.7434	6.6181	***
	20	5.4193	-0.0	3.5743	7.2644	***
	40	3.5506	0.0	1.7794	5.3218	***
Stade tallage	0,5	1.23	0.5744	-0.5095	2.9695	
	5	2.624	0.0001	0.779	4.469	***
	10	3.0717	0.0	1.3322	4.8112	***
	20	2.7122	0.0	0.9727	4.4517	***
	40	2.9294	0.0	1.1899	4.669	***
Stade paniculaire	0,5	-1.2556	0.5332	-2.9951	0.484	
	5	1.7567	0.0446	0.0172	3.4962	*
	10	1.3846	0.5531	-0.5527	3.322	
	20	1.9311	0.0128	0.1916	3.6706	*
	40	2.7629	0.0	0.9917	4.5341	***
Stade de floraison	0,5	-1.3571	0.412	-3.1283	0.4141	
	5	1.7138	0.164	-0.2235	3.6512	
	10	2.6387	0.0001	0.7936	4.4837	***
	20	4.2706	-0.0	2.531	6.0101	***
	40	2.8793	0.0	1.0343	4.7244	***

Tableau A-46 : Teneur en calcium, potassium et silicium dans les racines des plantes de riz des plantes témoins et les plantes ayant reçu 0,5, 10 et 40 kg m⁻² de téphra au stade plantule et stade de floraison.

Test	Ca (mg/kg)	K (mg/kg)	Si (mg/kg)
Témoin	3030	8029	408784
Témoin	6235	10859	364274
Témoin	3233	10818	349307
Témoin	4973	10020	389498
SPL0,5	45067	13771	255143
SPL0,5	22712	9652	325828
SPL0,5	26922	12577	292200
SPL0,5	18291	8996	182085
SPL10	19533	37069	267383
SPL10	23507	36270	202774
SPL10	15112	31593	292993
SPL10	17663	45545	223350
SPL40	14923	60604	213189
SPL40	16517	41797	236876
SPL40	15927	53997	205538
SPL40	18123	52341	219977
SL0,5	25484	25281	219411
SL0,5	24258	18833	286542
SL0,5	15673	13994	325766
SL0,5	19254	13337	333501
SL10	15773	36717	260402
SL10	17673	13119	323304
SL10	23111	32927	290274
SL10	21926	17411	328665
SL40	17964	24566	314835
SL40	24384	44468	248919
SL40	21861	41725	230831
SL40	12252	37546	180281

Tableau A-47 : Teneur en calcium, potassium et silicium dans les tiges et feuilles des plantes de riz des plantes témoins et les plantes ayant reçu 0,5, 10 et 40 kg m⁻² de téphra au stade plantule et stade de floraison.

Test	Ca (mg/kg)	K (mg/kg)	Si (mg/kg)
Témoin	4427	25294	13556
Témoin	4269	24579	12993
Témoin	6258	20097	14941
Témoin	6973	34287	19495
SPL0,5	4960	19982	14845
SPL0,5	5590	21872	11801
SPL0,5	3707	21596	13582
SPL0,5	4755	23684	12663
SPL10	1492	15143	14512
SPL10	6859	20935	26031
SPL10	5830	22605	23807
SPL10	3526	20743	22630
SPL40	3605	23068	34140
SPL40	3172	23970	26332
SPL40	4452	20211	32817
SPL40	3650	21570	30231
SL0,5	4339	34089	22958
SL0,5	6425	28211	15323
SL0,5	6188	32909	14515
SL0,5	5764	25728	14637
SL10	5078	25606	24276
SL10	3687	24738	10471
SL10	5885	44597	26549
SL10	5842	32970	37759
SL40	4985	29849	38415
SL40	6912	28990	51704
SL40	11913	32245	46353
SL40	5746	30851	30034

Tableau A-48 : Teneur en calcium, potassium et silicium dans les épillets des plantes de riz des plantes témoins et les plantes ayant reçu 0,5, 10 et 40 kg m⁻² de téphra au stade plantule et stade de floraison.

Test	Ca (mg/kg)	K (mg/kg)	Si (mg/kg)
Temoin	531	5081	10921
Temoin	759	5040	9190
Temoin	684	6149	6497
Temoin	524	5557	9171
SPL0,5	492	4091	8672
SPL0,5	532	4698	5963
SPL0,5	577	4934	7844
SPL10	549	5139	9981
SPL10	444	4916	10749
SPL10	565	4774	15511
SPL40	434	5051	13017
SPL40	364	5395	11329
SPL40	418	4252	14829
SL0,5	461	4858	13216
SL0,5	519	4857	9310
SL0,5	520	4719	10699
SL10	691	5995	11457
SL10	389	5226	10610
SL10	589	5587	12025
SL40	454	4670	12261
SL40	428	5106	16478
SL40	422	4750	15205

Tableau A-49 : Résultats du test de Dunnett pour la teneur en potassium dans les racines, les tiges et les feuilles et les épillets aux stades plantule et stade de floraison après traitement avec 0,5, 10 et 40 kg m⁻² de téphra. meandiff: différence moyenne entre les plantes traitées aux cendres et les plantes témoins; lower : limites inférieures de l'intervalle de confiance à 95% de la différence moyenne; upper : limites supérieures de l'intervalle de confiance à 95% de la différence moyenne; p-valeur : statistique de l'essai.

plant part	test	meandiff	p-adj	lower	upper	reject
root	SPL0,5	-1317.5	1.0	-17397.4542	14762.4542	
root	SPL10	-27687.75	0.0003	-43767.7042	-11607.7958	***
root	SPL40	-42253.25	0.0	-58333.2042	-26173.2958	***
root	SL0,5	-7929.75	0.6819	-24009.7042	8150.2042	
root	SL10	-15112.0	0.0745	-31191.9542	967.9542	
root	SL40	-27144.75	0.0003	-43224.7042	-11064.7958	***
stems/leaves	SPL0,5	4280.75	0.849	-6507.6533	15069.1533	
stems/leaves	SPL10	6207.75	0.5194	-4580.6533	16996.1533	
stems/leaves	SPL40	3859.5	0.9002	-6928.9033	14647.9033	
stems/leaves	SL0,5	-5672.0833	0.6942	-17324.8908	5980.7241	
stems/leaves	SL10	-4663.55	0.7523	-14898.3281	5571.2281	
stems/leaves	SL40	-4419.5	0.8297	-15207.9033	6368.9033	
spikelets	SPL0,5	882.4167	0.1145	-140.672	1905.5053	
spikelets	SPL10	513.75	0.6273	-509.3387	1536.8387	
spikelets	SPL40	557.4167	0.5425	-465.672	1580.5053	
spikelets	SL0,5	645.4167	0.383	-377.672	1668.5053	
spikelets	SL10	-145.9167	0.9987	-1169.0053	877.172	
spikelets	SL40	614.75	0.4358	-408.3387	1637.8387	

Tableau A-50 : Résultats du test de Dunnett pour la teneur en calcium dans les racines, les tiges et les feuilles et les épillets aux stades plantule et stade de floraison après traitement avec 0,5, 10 et 40 kg m⁻² de téphra. meandiff: différence moyenne entre les plantes traitées aux cendres et les plantes témoins; lower : limites inférieures de l'intervalle de confiance à 95% de la différence moyenne; upper : limites supérieures de l'intervalle de confiance à 95% de la différence moyenne; p-valeur : statistique de l'essai.

plant part	test	meandiff	p-adj	lower	upper	reject
root	SPL0,5	-23880.25	0.0001	-36630.2555	-11130.2445	***
root	SPL10	-14586.0	0.0183	-27336.0055	-1835.9945	**
root	SPL40	-12004.75	0.0736	-24754.7555	745.2555	
root	SL0,5	-16799.5	0.0052	-29549.5055	-4049.4945	***
root	SL10	-15253.0	0.0126	-28003.0055	-2502.9945	**
root	SL40	-14747.5	0.0168	-27497.5055	-1997.4945	**
stems/leaves	SPL0,5	728.75	0.9959	-3178.7147	4636.2147	
stems/leaves	SPL10	1055.0	0.9721	-2852.4647	4962.4647	
stems/leaves	SPL40	1762.0	0.7608	-2145.4647	5669.4647	
stems/leaves	SL0,5	-168.9167	1.0	-4389.4609	4051.6276	
stems/leaves	SL10	230.55	1.0	-3476.3965	3937.4965	
stems/leaves	SL40	-1907.25	0.6917	-5814.7147	2000.2147	
spikelets	SPL0,5	90.8333	0.7845	-125.7207	307.3874	
spikelets	SPL10	105.1667	0.6601	-111.3874	321.7207	
spikelets	SPL40	219.1667	0.0464	2.6126	435.7207	
spikelets	SL0,5	124.5	0.4841	-92.054	341.054	
spikelets	SL10	68.1667	0.9293	-148.3874	284.7207	
spikelets	SL40	189.8333	0.1055	-26.7207	406.3874	*

Tableau A-51 : Résultats du test de Dunnett pour la teneur en silicium dans les racines, les tiges et les feuilles et les épillets aux stades plantule et stade de floraison après traitement avec 0,5, 10 et 40 kg m⁻² de téphra. meandiff: différence moyenne entre les plantes traitées aux cendres et les plantes témoins; lower : limites inférieures de l'intervalle de confiance à 95% de la différence moyenne; upper : limites supérieures de l'intervalle de confiance à 95% de la différence moyenne; p-valeur : statistique de l'essai.

plant part	test	meandiff	p-adj	lower	upper	reject
root	SPL0,5	114151.75	0.0183	14410.2442	213893.2558	*
root	SPL10	131340.75	0.0052	31599.2442	231082.2558	**
root	SPL40	159070.75	0.0007	59329.2442	258812.2558	***
root	SL0,5	86660.75	0.1167	-13080.7558	186402.2558	
root	SL10	77304.5	0.2023	-22437.0058	177046.0058	
root	SL40	134249.25	0.0042	34507.7442	233990.7558	**
stems/leaves	SPL0,5	2023.5	0.9994	-13133.0906	17180.0906	
stems/leaves	SPL10	-6498.75	0.799	-21655.3406	8657.8406	
stems/leaves	SPL40	-15633.75	0.0404	-30790.3406	-477.1594	*
stems/leaves	SL0,5	-2352.4167	0.999	-18723.4056	14018.5723	
stems/leaves	SL10	-7492.15	0.6271	-21870.9544	6886.6544	
stems/leaves	SL40	-26380.25	0.0002	-41536.8406	-11223.6594	***
spikelets	SPL0,5	1451.75	0.9504	-3544.5653	6448.0653	
spikelets	SPL10	-3135.5833	0.3886	-8131.8987	1860.732	
spikelets	SPL40	-4113.5833	0.1434	-9109.8987	882.732	
spikelets	SL0,5	-2130.25	0.7724	-7126.5653	2866.0653	
spikelets	SL10	-2419.25	0.663	-7415.5653	2577.0653	
spikelets	SL40	-5703.25	0.0205	-10699.5653	-706.9347	*

Tableau A-52 : Résultats de la perte de production moyenne des panicules des stades plantules, de tallage, d'amorçage et de floraison selon une charge de téphra de 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻². Mise en évidence de la valeur la plus basse (LW 0,34), de la valeur la plus haute (UB 0,34) et de la médiane selon une loi normale.

Stade phénologique	Charge (kg m-2)	Nombre de répétitions	Moyenne (nombre)	Ecart-type	LW 0.34	UB 0.34	Médiane	Moyenne (nombre)
control	0,00	30,00	5,30	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
plantule	0,50	16,00	5,44	1,46	-12,46	6,41	-2,60	-3,03
plantule	5,00	10,00	7,80	3,16	-68,26	-27,43	-47,17	-47,84
plantule	10,00	13,00	6,00	2,35	-27,60	0,21	-13,19	-13,69
plantule	20,00	15,00	5,53	1,73	-15,40	5,74	-4,39	-4,83
plantule	40,00	17,00	5,71	1,83	-18,79	2,57	-7,66	-8,11
tallage	0,50	18,00	4,78	1,66	0,24	18,69	9,86	9,46
tallage	5,00	15,00	5,00	1,85	-5,36	15,87	5,67	5,26
tallage	10,00	18,00	4,61	1,09	5,24	19,99	13,00	12,62
tallage	20,00	18,00	4,78	1,11	1,87	17,05	9,86	9,46
tallage	40,00	18,00	5,17	1,76	-7,74	11,94	2,52	2,10
amorçage	0,50	18,00	4,78	1,11	1,86	17,06	9,87	9,46
amorçage	5,00	18,00	4,44	1,10	8,54	23,01	16,14	15,77
amorçage	10,00	17,00	4,44	1,15	8,42	23,38	16,28	15,90
amorçage	20,00	18,00	5,22	0,94	-6,60	8,68	1,49	1,04
amorçage	40,00	18,00	4,53	1,04	7,01	21,34	14,55	14,17
floraison	0,50	18,00	4,06	1,43	15,23	31,05	23,48	23,14
floraison	5,00	8,00	3,50	1,51	23,12	44,21	33,97	33,67
floraison	10,00	15,00	5,07	1,58	-5,66	13,69	4,43	4,01
floraison	20,00	18,00	4,28	1,53	10,55	27,33	19,29	18,94
floraison	40,00	18,00	4,28	1,60	10,32	27,58	19,30	18,95

Tableau A-53 : Résultats de la perte de production moyenne de la biomasse de la paille des stades plantules, de tallage, d'amorçage et de floraison selon une charge de téphra de 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻². Mise en évidence de la valeur la plus basse (LW 0,34), de la valeur la plus haute (UB 0,34) et de la médiane selon une loi normale.

Stade phénologique	Charge (kg m-2)	Nombre de répétitions	Moyenne (g)	Ecart-type	LW 0.34	UB 0.34	Médiane	Moyenne (g)
control	0,00	30,00	11,46	4,57	0,00	0,00	0,00	0,00
plantule	0,50	16,00	12,42	3,08	-20,95	3,32	-8,30	-8,81
plantule	5,00	10,00	18,61	5,98	-76,97	-49,22	-62,34	-63,10
plantule	10,00	13,00	15,24	4,49	-50,21	-16,95	-32,92	-33,58
plantule	20,00	15,00	15,05	3,88	-45,24	-18,66	-31,32	-31,95
plantule	40,00	17,00	13,01	3,39	-25,21	-2,95	-13,54	-14,08
tallage	0,50	18,00	11,95	3,75	-14,58	5,14	-4,23	-4,72
tallage	5,00	15,00	14,10	4,31	-35,36	-11,83	-23,00	-23,59
tallage	10,00	18,00	13,13	3,56	-26,65	-3,45	-14,48	-15,05
tallage	20,00	18,00	11,21	2,39	-8,05	11,46	2,16	1,70
tallage	40,00	18,00	12,20	3,29	-15,72	1,81	-6,47	-6,96
amorçage	0,50	18,00	11,93	2,82	-14,25	5,15	-4,04	-4,55
amorçage	5,00	18,00	12,24	2,72	-16,53	1,98	-6,78	-7,28
amorçage	10,00	17,00	12,13	2,98	-15,48	2,88	-5,79	-6,30
amorçage	20,00	18,00	12,16	2,48	-16,03	2,80	-6,10	-6,61
amorçage	40,00	18,00	11,33	2,95	-7,68	9,18	1,21	0,75
floraison	0,50	18,00	8,96	3,16	13,52	29,40	21,84	21,46
floraison	5,00	8,00	8,34	4,33	16,33	37,50	27,26	26,91
floraison	10,00	15,00	12,69	3,61	-23,25	0,86	-10,65	-11,20
floraison	20,00	18,00	9,89	3,82	4,05	22,63	13,77	13,34
floraison	40,00	18,00	9,62	3,14	6,17	25,20	16,10	15,69

Tableau A-54 : Résultats de la perte de production moyenne de la biomasse des épillets des stades plantules, de tallage, d'amorçage et de floraison selon une charge de téphra de 0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻². Mise en évidence de la valeur la plus basse (LW 0,34), de la valeur la plus haute (UB 0,34) et de la médiane selon une loi normale.

Stade phénologique	Charge (kg m ⁻²)	Nombre de répétitions	Moyenne (n)	Ecart-type	LW 0.34	UB 0.34	Médiane	Moyenne (g)
control	0,00	30,00	5,47	2,41	0,00	0,00	0,00	0,00
plantule	0,50	16,00	8,09	2,33	-64,16	-33,62	-48,06	-48,89
plantule	5,00	10,00	13,87	6,21	-194,76	-115,73	-153,71	-155,24
plantule	10,00	13,00	9,66	5,08	-105,86	-49,65	-76,71	-77,76
plantule	20,00	15,00	10,24	2,61	-107,07	-69,86	-87,38	-88,47
plantule	40,00	17,00	8,42	2,66	-71,30	-38,60	-54,04	-54,95
tallage	0,50	18,00	8,47	2,71	-72,28	-39,53	-54,96	-55,91
tallage	5,00	15,00	8,76	3,06	-79,69	-42,65	-60,22	-61,17
tallage	10,00	18,00	8,61	2,21	-73,65	-43,27	-57,54	-58,46
tallage	20,00	18,00	9,28	1,99	-86,23	-55,37	-69,80	-70,80
tallage	40,00	18,00	8,82	2,95	-79,73	-44,97	-61,39	-62,35
amorçage	0,50	18,00	7,91	1,44	-58,22	-32,96	-44,74	-45,59
amorçage	5,00	18,00	8,24	2,02	-65,92	-37,36	-50,76	-51,64
amorçage	10,00	17,00	8,19	2,09	-65,26	-36,19	-49,84	-50,73
amorçage	20,00	18,00	7,92	1,87	-59,28	-32,21	-44,89	-45,75
amorçage	40,00	18,00	7,63	1,92	-53,79	-27,09	-39,60	-40,44
floraison	0,50	18,00	7,01	2,44	-43,05	-14,91	-28,22	-28,98
floraison	5,00	8,00	6,90	4,07	-53,98	0,03	-26,19	-26,98
floraison	10,00	15,00	9,47	3,11	-93,67	-54,90	-73,28	-74,29
floraison	20,00	18,00	8,17	2,76	-66,54	-34,15	-49,46	-50,34
floraison	40,00	18,00	8,20	2,85	-67,37	-34,45	-50,02	-50,91

Quantification de la vulnérabilité d'une culture de riz (IR29) face aux chutes de téphra

Gervais Victoria

Environ 1500 volcans sont répertoriés sur Terre, avec 40 à 50 éruptions annuelles. Les éruptions volcaniques, bien que bénéfiques pour les sols, présentent des risques majeurs pour l'agriculture, notamment dans la région méditerranéo-asiatique. Les retombées de téphra peuvent causer d'importantes pertes agricoles, représentant en moyenne 30% des pertes totales dans l'agriculture, la foresterie, la pêche et l'aquaculture. La proximité des plantations de riz avec les volcans expose ce secteur agricole, crucial pour plus de trois milliards de personnes, à une vulnérabilité accrue aux aléas volcaniques, avec de potentielles conséquences économiques significatives.

Cette étude comble certaines lacunes des modèles actuels en fournissant des données sur l'impact et la vulnérabilité des cultures de riz aux dépôts de téphra. Une expérience contrôlée a été menée, soumettant la variété de riz IR29 (cultivar *Oryza Sativa indica*) à différentes charges massiques de téphra (0,5, 5, 10, 20 et 40 kg m⁻²), représentative des éruptions explosives, lors de divers stades de croissance (stade paniculaire, tallage, amorçage et floraison). Cette étude évalue l'impact des téphra sur la culture du riz en faisant des observations visuelles et des analyses portant sur la croissance (hauteur, nombre de feuilles, sortie des panicules), la fertilité (panicules, épillets, paille) et la teneur en éléments minéraux (potassium, calcium et silicium).

Les plants de riz, exposés aux dépôts de téphra, présentent une diminution de la surface foliaire verte à tous les stades de croissance, sans subir de dommages irréversibles. Les observations soulignent que la rétention du téphra sur les feuilles et les panicules dépend du stade phénologique des plantes et de la quantité déposée. L'étude indique également que le moment de l'épandage de téphra influence la croissance et l'émergence des panicules, suggérant même un possible effet fertilisant grâce à la libération de nutriments. Un dépôt de téphra engendrait également une production d'épillets plus importante, surtout lorsque le téphra est appliqué en début de croissance des plantes. Ainsi, les résultats mettent en évidence la faible vulnérabilité des plantes de riz face aux dépôts de téphra, avec des impacts limités voire des effets bénéfiques. Une résilience qui est rare en dans le domaine agricole. Cela suggère que l'adoption d'une culture de riz pourrait être potentiellement recommandable pour les agriculteurs opérant dans les zones volcaniquement actives, où les conditions climatiques sont favorables à sa culture.