



AGRICULTURE TROPICALE &  
DEVELOPPEMENT DURABLE

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

-----  
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES  
-----

Mention : Agriculture Tropicale et Développement Durable  
-----

Parcours : Bio-fonctionnement des Sols et Environnement

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur Agronome au  
grade de Master II

---

**POTENTIEL DU LOMBRICOMPOST ET DES VERS DE TERRE A  
AMÉLIORER LA RÉSILIENCE CLIMATIQUE DU RIZ PLUVIAL :  
ESSAI EN SITUATION CONTROLÉE**

---

Présenté par RANDRIANTSOA Toky Nantenaina  
Promotion : Fanjava Mahasaky (2017-2022)

Soutenu le 12 / 12 / 2022 devant le jury composé de :

- Président : Docteur Denis RANDRIAMAMPIONONA
- Examineur : Docteur/HDR Norosoa Christine RAZAFINDRAMANANA
- Maître de stage : Docteur/HDR Eric BLANCHART
- Encadrant : Docteur/HDR Hery Manantsoa RAZAFIMAHATRATRA
- Co-encadrant : Docteur Onja Hasinahary RATSIATOSIKA





AGRICULTURE TROPICALE &  
DEVELOPPEMENT DURABLE

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

-----  
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES  
-----

Mention : Agriculture Tropicale et Développement Durable  
-----

Parcours : Bio-fonctionnement des Sols et Environnement

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur Agronome au  
grade de Master II

---

**POTENTIEL DU LOMBRICOMPOST ET DES VERS DE TERRE A  
AMÉLIORER LA RÉSILIENCE CLIMATIQUE DU RIZ PLUVIAL :  
ESSAI EN SITUATION CONTROLÉE**

---

Présenté par RANDRIANTSOA Toky Nantenaina  
Promotion : Fanjava Mahasaky (2017-2022)

Soutenu le 12 / 00 / 2022 devant le jury composé de :

- Président : Docteur Denis RANDRIAMAMPIONONA
- Examineur : Docteur/HDR Norsoa Christine RAZAFINDRAMANANA
- Maître de stage : Docteur/HDR Eric BLANCHART
- Encadrant : Docteur/HDR Hery Manantsoa RAZAFIMAHATRATRA
- Co-encadrant : Docteur Onja Hasinahary RATSIATOSIKA





## REMERCIEMENTS

*« Je te célèbre, car j'ai été fait de façon merveilleuse. Tes œuvres sont étonnantes, je le sais bien. »*

*Psaumes 139 : 14*

Au terme de la réalisation de ce mémoire, je tiens à exprimer mes sincères remerciements à ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à sa concrétisation. J'adresse particulièrement mes sincères remerciements aux membres du jury, à l'encontre de :

- Monsieur Denis RANDRIAMAMPIONONA, Docteur en Sciences de la Vie, Enseignant - Chercheur à l'ESSA, d'avoir accepté de présider le jury durant la soutenance de ce mémoire. Merci également pour le temps que vous accordez à cette soutenance, malgré vos nombreuses occupations. Veuillez recevoir mes respects les plus sincères, Monsieur le Président du jury.
- Madame Norsoa Christine RAZAFINDRAMANANA, Docteur/HDR en Sciences Agronomiques, Enseignante - Chercheur à l'ESSA, qui a bien voulu siéger parmi les membres du jury en tant qu'examinateur, malgré ses nombreuses occupations. Votre expertise sera vraiment essentielle et ajoutera plus de valeur à ce travail.
- Monsieur Eric BLANCHART, Docteur/HDR en Science de la Vie, Directeur de recherche à l'UMR Eco&Sols - IRD, Directeur adjoint de l'École Doctorale GAIA - Université de Montpellier, chercheur en accueil au LRI, mon maitre de stage. Je ne saurais assez vous remercier pour tout le temps que vous m'avez accordé durant ce stage, malgré vos nombreuses occupations. Merci pour vos enseignements, vos conseils et vos encouragements. Merci pour la patience et la bienveillance dont vous avez fait preuve à mon égard durant ces plusieurs mois.
- Monsieur Hery Manantsoa RAZAFIMAHATRATRA, Docteur/HDR en Sciences Agronomiques (Agro-Pédologue), Enseignant - chercheur à l'ESSA et Responsable de la mention AT2D, mon encadrant. Merci Monsieur pour tous vos conseils et vos enseignements. Que ce soit lors de ce stage ou lors de vos cours, vos réflexions ont toujours été pour moi les plus instructives. Merci pour la patience et la bienveillance dont vous avez fait preuve à mon égard, malgré vos nombreuses occupations.
- Madame Onja Hasinahary RATSIATOSIKA, Docteur en Sciences Agronomiques, Enseignante - Chercheur à l'ESSA, post-doctorante au LRI, mon co-encadrant. Merci pour tous les efforts que vous avez déployés pour le bon déroulement de mon stage. Merci pour tous vos précieux conseils et vos encouragements. Merci pour votre appui inestimable et surtout pour votre implication active tout au long de mon stage, malgré vos nombreuses occupations.

Bien qu'elles ne soient pas parmi les membres du jury, certaines personnes ont contribué activement à la réalisation de mon stage de mémoire. J'adresse ainsi mes pensées les plus sincères à l'encontre de :

- Madame Tantely RAZAFIMBELO, Professeur titulaire et Directeur du LRI, qui a bien voulu m'accueillir en tant que stagiaire au sein du laboratoire. Merci également pour votre implication dans ce travail et pour tous les conseils que vous avez donnés.
- Madame Laetitia BERNARD, Docteur en Océanologie Biologique, chercheur à l'UMR Eco&Sols – IRD, chercheur en accueil au LRI. Merci pour votre implication dans ce travail et pour tous les conseils que vous avez donnés. Merci également pour la bonne humeur que vous partagez tous les jours.
- Monsieur Damase Hilaire Andrianantenaina RAZAFIMAHAFALY, Ingénieur d'étude en Biologie du sol en charge du Laboratoire Biologique du LRI. Merci pour votre aide précieuse durant l'expérimentation. Votre expertise a vraiment été indispensable tout au long de ce stage. Merci également pour tous vos précieux conseils durant les manipulations.
- Monsieur Andry Andriamalala RAKOTOARISOA, gardien au sein du LRI. Merci d'avoir bien voulu m'aider à suivre l'expérimentation durant les week-ends. Votre aide m'a vraiment été précieuse.

Je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à :

- Tous les chercheurs, les personnels technique et administratif du LRI, pour leur chaleureux accueil et leur contribution directe ou indirecte à la réalisation de ce mémoire.
- Tout le personnel administratif et pédagogique de l'ESSA, notamment de la Mention AT2D sans lequel nous ne serions pas arrivés aux termes de notre cursus universitaire.
- Les doctorants et les stagiaires du LRI, particulièrement Tahiry, Honoré et Tiavina. Merci pour tous ces moments plaisants passés au LRI.
- Mes amis et camarades de la promotion FANJAVA Mahasaky, surtout ceux de la mention AT2D, particulièrement Fanilo, Tahiry, Honoré, Daniel, Nathalia, Felana, Larissa, Nantsoina, Tsivery, Lova, Sena et Telina.
- Mes parents et mes deux grands frères. Merci pour vos soutiens quotidiens. Je suis tellement béni de vous avoir.

Que tous ce qui m'ont aidé d'une quelconque manière trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude. Que Dieu vous bénisse et vous apporte paix, joie et amour.

# SOMMAIRE

LISTES DES ILLUSTRATIONS .....	a
LISTES DES ABRÉVIATIONS.....	b
GLOSSAIRE.....	d
RÉSUMÉ.....	e
ABSTRACT .....	f
FINTINA.....	g
INTRODUCTION.....	1
1 MATÉRIELS ET MÉTHODES .....	4
1.1 Matériels utilisés.....	4
1.2 Dispositif expérimental.....	6
1.3 Mesures effectuées .....	13
1.4 Traitements statistiques .....	14
2 RÉSULTATS.....	16
2.1 Capacité au champ du sol .....	16
2.2 Durées des stress hydriques.....	16
2.3 Survie et activité des vers de terre à la fin de l'expérimentation.....	17
2.4 Analyse de l'effet du lombricompost et des vers pour chaque situation climatique .....	19
3 DISCUSSION ET PERSPECTIVES .....	33
3.1 Persistance des vers de terre à la fin de l'expérimentation.....	33
3.2 Effets du lombricompost et des vers de terre sur la croissance du riz en absence de stress climatique .....	35
3.3 Effets du lombricompost et des vers de terre sur la croissance et la capacité d'adaptation du riz en situation de stress climatique.....	36
3.4 Limites de l'étude et perspectives .....	41
CONCLUSION .....	42
BIBLIOGRAPHIE .....	i
LISTES DES ANNEXES.....	x

## LISTES DES ILLUSTRATIONS

### Liste des figures

Figure 1 : Carte de localisation du site de prélèvement du sol.....	4
Figure 2 : Schéma illustrant la disposition des pots dans la salle (vue de dessus).....	11
Figure 3 : Capacité au champ du sol .....	16
Figure 4 : Évolution de l'humidité du sol lors de la 1ère série de température (TN) .....	17
Figure 5 : Évolution de l'humidité du sol lors de la 2ème série de température (TS).....	17
Figure 6 : Taux de survie des vers de terre par traitement .....	18
Figure 7 : Taux de vers de terre actifs par traitement.....	19
Figure 8 : Croissances en hauteur du riz pour chaque situation climatique.....	20
Figure 9 : Nombres de talles finals du riz pour chaque situation climatique.....	23
Figure 10 : Biomasse aérienne du riz pour chaque situation climatique.....	25
Figure 11 : Biomasse racinaire du riz pour chaque situation climatique .....	27
Figure 12 : Biomasse totale du riz pour chaque situation climatique .....	29
Figure 13 : Ratios BA/BR du riz pour chaque situation climatique.....	32

### Liste des tableaux

Tableau 1 : Composition chimique des fertilisants organiques utilisés pour l'expérimentation ....	5
Tableau 2 : Température dans la salle d'incubation selon la modalité de température .....	8

### Liste des clichés

Cliché 1 : <i>Pontoscolex corethrurus</i> ou <i>kankamena</i> .....	6
Cliché 2 : Design des pots utilisés pour l'expérimentation .....	9
Cliché 3 : Disposition des pots dans la salle .....	10
Cliché 4 : Sol saturé en eau laissé drainer sur une passoire .....	13
Cliché 5 : Ver de terre en quiescence.....	14

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

<b>ABA</b>	: Acide Abscissique
<b>ADAF</b>	: Association drômoise d'agroforesterie
<b>ANOVA</b>	: Analysis of variance (analyse de variance)
<b>AT2D</b>	: Agriculture Tropicale et Développement Durable
<b>AVSF</b>	: Agronomes et Vétérinaires Sans Frontières
<b>BA</b>	: Biomasse Aérienne
<b>BR</b>	: Biomasse Racinaire
<b>BSE</b>	: Bio-fonctionnement des Sols et Environnement
<b>Cc</b>	: Capacité au champ
<b>ESSA</b>	: Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques
<b>F</b>	: Fumier traditionnel
<b>FAO</b>	: Food and Agriculture Organization (organisation pour l'alimentation et l'agriculture)
<b>FO</b>	: Fertilisants Organiques
<b>FOFIFA</b>	: Foibem-pirenena momba ny Fikarohana ampiarina amin'ny Fampandrosoana ny eny Ambanivohitra (centre national de recherche appliquée au développement rural)
<b>GIZ</b>	: Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (agence allemande de coopération internationale pour le développement)
<b>GSDM</b>	: Groupement Semis Direct Madagascar
<b>H100</b>	: Humidité optimale du sol
<b>H50</b>	: Fort stress hydrique
<b>H75</b>	: Léger stress hydrique
<b>Innov'Earth</b>	: Innovative Earthworms
<b>IPCC</b>	: Intergovernmental Panel on Climate Change (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat)
<b>IRD</b>	: Institut de Recherche pour le Développement
<b>JAG</b>	: Jour Après Germination
<b>L</b>	: Lombricompost
<b>LED</b>	: Light Emitting Diode (diode électroluminescente)
<b>LRI</b>	: Laboratoire des RadioIsotopes
<b>MAEP</b>	: Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche



<b>MS</b>	: Matière Sèche
<b>PAM</b>	: Programme Alimentaire Mondial
<b>pF</b>	: Potentiel of Free energy (potentiel d'énergie libre)
<b>PFFD</b>	: Photosynthetic Photon Flux Density (densité du flux de photons photosynthétiques)
<b>SECURE</b>	: Soil ECological fUnction REstoration (restauration de la fonction écologique du sol)
<b>TN</b>	: Température Normale
<b>TS</b>	: Température incluant un Stress thermique de 2 semaines
<b>V-</b>	: Sans inoculation de Vers de terre
<b>V+</b>	: Avec inoculation de Vers de terre

## GLOSSAIRE

- **Agroécologie** : ensemble de pratiques consistant à améliorer les performances de l'agriculture par l'intégration de principes écologiques dans la gestion des exploitations et des systèmes (Wezel *et al.*, 2015).
- **Agrosystème** : écosystème cultivé, correspondant généralement à l'unité spatiale d'une exploitation agricole et dont les fonctions écosystémiques sont valorisées par l'homme sous la forme de biens et services agricoles. Il est donc coproduit par la nature et l'homme (Neyton *et al.*, 2022).
- **Capacité au champ** : humidité du sol après drainage de l'eau contenue dans les macropores par action de la gravité (de Oliveira *et al.*, 2015).
- **Euryèce** : se dit d'une espèce pouvant vivre dans des environnements variés.
- **Lombricompost** : produit de compostage de la matière organique issu de l'utilisation de vers de terre (Manyuchi *et al.*, 2013)
- **Lumen** : unité de mesure de flux lumineux (unité dérivée du Système international) équivalant au flux lumineux émis dans 1 stéradian par une source ponctuelle uniforme placée au sommet de l'angle solide et ayant une intensité de 1 candela (définition tirée du dictionnaire Larousse).
- **Quiescence (des vers de terre)** : Période comparable à l'hibernation, une phase durant laquelle les vers ralentissent leur activité métabolique en s'enroulant sur elle-même. Cette léthargie a lieu en réponse à des conditions environnementales défavorables (ADAF, 2021).
- **Résilience** : capacité à s'adapter aux perturbations ou à revenir à un régime de routine face à un milieu changeant (Oliveira *et al.*, 2019).
- **Solutions fondées sur la nature** : ensemble d'actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés, pour relever directement les enjeux de la société de manière efficace et adaptative tout en assurant le bien-être humain et les avantages pour la biodiversité (Cohen-Shacham *et al.*, 2016).
- **Stress hydrique** : situation dans laquelle l'extraction d'eau des racines est inférieure à la perte d'eau des plantes qui est déterminée par la demande d'évaporation de l'atmosphère (Hall, 1993).
- **Stress thermique** : augmentation de la température au-delà d'un niveau seuil pendant une période suffisante pour causer des dommages irréversibles à la croissance et au développement des plantes (Wahid *et al.*, 2007).

## RÉSUMÉ

Sur les Hautes Terres centrales de Madagascar, le riz pluvial occupe une place importante dans la sécurité alimentaire. Pourtant, cette culture est particulièrement vulnérable au changement climatique. De plus, les problèmes liés à la fertilité des Ferralsols limitent sérieusement la production de cette culture. En vue de redresser la fertilité de ces sols, mais aussi d'améliorer le rendement et la résilience climatique du riz pluvial, le projet Innov'Earth vise à proposer des pratiques de fertilisation innovantes prenant en compte le lombricompost et les vers de terre. Cette étude, inclut dans le cadre du projet Innov'Earth, a pour principal objectif de comprendre, par une approche en situation contrôlée, si des fertilisations innovantes prenant en compte le lombricompost et/ou les vers de terre pourraient améliorer la résilience climatique du riz pluvial. Une expérimentation en salle d'incubation a donc été lancée dans laquelle nous avons appliqué différentes situations climatiques au riz, en modifiant d'une part la température dans la salle pour appliquer un stress thermique, et d'autre part, le régime hydrique du sol pour appliquer un stress hydrique. Pour chaque situation climatique, deux facteurs ont été étudiés : (i) le type de fertilisant organique, regroupant le fumier (en tant que témoin représentant la pratique paysanne) et le lombricompost, et (ii) l'inoculation de vers de terre, regroupant des situations avec et sans vers de terre. Au bout de 6 semaines de croissance, les résultats ont montré que dans toutes les situations climatiques, le lombricompost a toujours montré une meilleure performance que le fumier sur tous les paramètres de croissance du riz qui ont été mesurés. En effet, en assurant une bonne nutrition à la plante, le lombricompost permet non seulement d'avoir une bonne croissance, mais favorise également l'activation des différents mécanismes d'adaptation aux stress climatiques. D'autre part, l'inoculation de vers de terre n'a pas montré d'effet significatif en absence de stress climatique, mais en a montré en situation de stress, notamment un effet positif en situation de stress thermique et un effet négatif en situation de stress hydrique. Il semblerait que ces effets soient dus à la capacité des vers de terre à produire dans leurs turricules des substances similaires aux phytohormones. Toutefois, des études plus approfondies sont à prévoir afin de confirmer et de mieux comprendre les mécanismes réels régissant à travers les effets des phytohormones secrétées par les vers de terre sur le comportement des plantes en situation de stress climatique.

**Mots-clés** : Stress thermique, Stress hydrique, Croissance, Adaptation aux stress climatiques, Nutrition, Phytohormones.

## ABSTRACT

In the central Highlands of Madagascar, rainfed rice plays an important role in food security. However, this crop is particularly vulnerable to climate change. In addition, problems related to the fertility of Ferralsols considerably limit the production of this crop. In order to improve the fertility of these soils, but also to improve the yield and climatic resilience of rainfed rice, the Innov'Earth project aims to propose innovative fertilisation practices that take into consideration vermicompost and earthworms. The main objective of this study, included in the Innov'Earth project, is to understand, through a controlled situation approach, if innovative fertilization practices taking into consideration vermicompost and/or earthworms could improve the climatic resilience of rainfed rice. An incubation room experiment was therefore launched in which we applied different climatic situations to the rice by modifying the temperature in the room to apply a heat stress, and the soil water regime to apply a water stress. For each climatic situation, two factors were studied: (i) the type of organic fertilizer, grouping manure (as a control representing farmers' practice) and vermicompost, and (ii) earthworm inoculation, grouping situations with and without earthworms. After 6 weeks of growth, the results showed that in all climatic situations, vermicompost always performed better than manure on all rice growth parameters. Indeed, by providing good nutrition to the plant, vermicompost not only allows for good growth, but also promotes the activation of different adaptation mechanisms to climatic stresses. On the other hand, earthworm inoculation did not show a significant effect in the absence of climatic stress, but did show a significant effect in stressful situations, notably a positive effect in heat stress situations and a negative effect in water stress situations. It seems that these effects are due to the ability of earthworms to produce phytohormone-like substances in their castings. However, further studies are needed to confirm and better understand the real mechanisms governing the effects of phytohormones secreted by earthworms on plant behaviour under climatic stress.

**Keywords** : Heat stress, Water stress, Growth, Adaptation to climatic stress, Nutrition, Phytohormones.

## FINTINA

Manana anjara toerana manokana amin'ny fanjarian-tsakafo eny amin'ny faritra afovoan-tanin'i Madagasikara ny vary an-tanety. Misedra olana maro anefa ny fambolena azy nohon'ny fiovan'ny toetr'andro. Etsy andaniny, anisan'ny mampihena ny voka-bary ihany koa ny toetran'ny karazan-tany eny amin'ny tanety. Mba hanatsarana ny toetran'ireo karazan-tany ireo, ary koa hanatsarana ny voka-bary sy ny fahafahan'ny vary an-tanety mizaka ny fiovan'ny toetr'andro, ny tetik'asa Innov'Earth dia mikasa hitondra soso-kevitra vaovao miompana amin'ny fampiasana zezika komposta avy amin'ny kankana sy ny fitondrana kankana amin'ny tany. Ny tanjon'ity fikarohana ity, izay ao anatin'ny tetik'asa Innov'Earth, dia ny hahafantatra, raha toa ka afaka manatsara ny fahafahan'ny vary an-tanety mizaka ny fiovan'ny toetr'andro ny fampiasana zezika komposta avy amin'ny kankana sy ny fitondrana kankana amin'ny tany. Araka izany dia nanantanteraka andrana fambolena an-efitrano izahay mba ahafahana mampihatra toetr'andro samihafa amin'ny vary, etsy andaniny, amin'ny alalan'ny fanovana ny mari-pana ao amin'ilay efitrano mba ahafahana mampisedra ny vary amin'ny hafanana ambony, etsy ankilany, amin'ny alalan'ny fanovana ny tahan'ny hamandoan'ny tany mba ahafahana mampisedra ny vary amin'ny haintany. Lafin-javatra roa no nodinihina isaky ny toetr'andro iray : (i) ny karazan-jezika organika izay misokajy roa dia ny zezi-pahitra nentim-paharazana sy ny komposta avy amin'ny kankana, sy (ii) ny fitondrana kankana na tsia amin'ny tany. Taorian'ny enina herinandro nanaovana ny andrana dia hita fa ny komposta avy amin'ny kankana hatrany no nahitana fitomboan'ny vary tsara kokoa raha oharina amin'ny zezi-pahitra, tao anatin'ireo karazana toetr'andro rehetra izay nandramana. Notsoahina tao anatin'izany fa mitondra ireo otrikaina ilain'ny zava-maniry amin'ny taha ambony kokoa ny komposta avy amin'ny kankana ka nampitombo tsara ny vary no sady nanampy azy tamin'ny fanalefahana ireo vokadratsin'ny hafanana sy ny haintany. Etsy ankilany kosa dia tsy nahitana vokany miavaka firy ny fitondrana kankana amin'ny tany rehefa tsy nisy haintany sy fiakaran'ny hafanana. Rehefa nisy kosa anefa izany dia hita fa nitondra vokatsoa tamin'ny vary ny kankana raha nisy fiakaran'ny hafanana, ary nitondra vokadratsy kosa izy raha nisy haintany. Heverina fa ny famokaran'ny kankana singa mitovitovy amin'ny tsiry mpanentan'ny zavamaniry amin'ny alalan'ny tainy no nahatonga ireo vokatsoa sy vokadratsy ireo. Na izany aza anefa dia tsara raha alalinina kokoa ny tena zava-mitranga marina mahakasika ireo singa vokarin'ny kankana ireo sy ny ifandraisan'izy ireny amin'ny toetry ny zava-maniry voasedran'ny hafanana ambony sy ny haintany.

**Teny manan-danja** : Fisedrana amin'ny hafanana ambony, Fisedrana amin'ny haintany, Fitomboana, Fahafahana mizaka ny hafanana ambony sy ny haintany, Otrikaina ilain'ny zava-maniry, Tsiry mpanentan'ny zava-maniry

## INTRODUCTION

La sécurité alimentaire mondiale est fortement menacée par le changement climatique (FAO, 2018). Le dernier rapport de l'IPCC (2021) prévoit une hausse de température de 1,4 à 4,4°C d'ici 2100, avec des répercussions considérables sur la fréquence et la quantité des précipitations dès 2040. La température et la disponibilité de l'eau étant des facteurs clés pour la croissance et la productivité des cultures, les changements prévus dans ces facteurs entraîneront certainement une réduction des rendements agricoles (Altieri *et al.*, 2015). Actuellement, les excès de chaleurs et les sécheresses entravent déjà la production agricole dans certaines régions du globe (Fahad *et al.*, 2017). En effet, ces stress climatiques nuisent à la production de nombreuses cultures telles que le riz, en raison de leurs effets négatifs sur la croissance (Sarvestani *et al.*, 2008), la physiologie (Hossain *et al.*, 2020 ; Cohen *et al.*, 2021) et la reproduction des plantes (Cao *et al.*, 2008 ; Wang *et al.*, 2019 ; Sun *et al.*, 2021).

Madagascar n'échappe pas à cette réalité. En effet, les tendances climatiques sur l'île prévoient une augmentation des températures avec des précipitations de plus en plus rares et aléatoires (DGM, 2019 ; GIZ, 2021 ; Weiskopf *et al.*, 2021). Les paysans malgaches, confrontés à l'incertitude et à la variabilité des conditions météorologiques, ont dû développer différentes pratiques d'adaptation, dont la plus connue et le plus évident est le décalage des calendriers culturels (AVSF, 2011). Toutefois, les baisses de rendement observées au cours de ces dernières années témoignent encore de leur forte vulnérabilité face au changement climatique (Harvey *et al.*, 2014).

Madagascar se trouve dans une situation critique. En effet, elle est considérée comme l'un des pays les plus vulnérables au changement climatique (AVSF, 2011). Dans les régions des Hautes Terres centrales, le riz pluvial occupe une place importante dans la sécurité alimentaire (Penot *et al.*, 2009). Pourtant, la riziculture pluviale est confrontée à de nombreux défis : sécheresse, variabilité des précipitations, bioagresseurs, pauvreté chimique des sols, faible productivité, faible qualité nutritionnelle des produits. Le changement climatique augmentera alors sûrement le niveau déjà élevé d'insécurité alimentaire et nutritionnelle dans ces régions (PAM, 2018).

Améliorer la résilience des agrosystèmes face au changement climatique est ainsi devenue une priorité absolue. Par définition, la résilience d'un agrosystème est sa capacité à s'adapter aux perturbations ou à revenir à un régime de routine face à un milieu changeant (Oliveira *et al.*, 2019). L'agroécologie, étant une solution fondée sur la nature, pourrait transformer les systèmes de production agricole en améliorant l'efficacité de l'utilisation des ressources naturelles (FAO, 2018). Elle pourrait en effet améliorer la résilience climatique des agrosystèmes en incitant l'agrobiodiversité, en améliorant la santé des sols, et en favorisant l'autonomie des systèmes agricoles (Altieri *et al.*, 2015 ; Leippert *et al.*, 2020).

D'autre part, les sols majoritaires des Hautes Terres, appelés Ferralsols, sols ferrallitiques ou encore sols des *tanety*, sont des sols acides particulièrement carencés en de nombreux nutriments (Raminoarison *et al.*, 2019), ce qui réduit considérablement le développement des plantes et des organismes du sol (Blanchart *et al.*, 2021). Malgré ces carences, de nombreux paysans se limitent encore à l'utilisation de ressources traditionnelles, notamment du fumier, pour fertiliser leurs champs de cultures (Andrianaivonirina, 2011). Certes, le fumier est considéré comme un bon amendement pour ces sols acides, mais sa faible teneur en éléments nutritifs nécessite un apport à forte dose pour pouvoir combler les besoins des cultures (MAEP, 2006 ; GSDM, 2020). Or, l'apport réel sur les parcelles reste limité car la production de fumier dans les exploitations familiales malgaches est encore très faible et tend même à diminuer dans certaines régions (Ravonjirarison *et al.*, 2018). D'où l'intérêt de proposer de nouvelles ressources fertilisantes.

C'est dans cette optique que le projet Innov'Earth, dans lequel s'inscrit cette étude, vise à proposer aux paysans d'Imerintsiasika, des pratiques de fertilisation innovantes prenant en compte le lombricompost et les vers de terre, en vue de redresser la fertilité des sols de *tanety* et d'améliorer le rendement, la qualité nutritionnelle ainsi que la résilience climatique du riz pluvial. En effet, des ateliers participatifs ont mis en évidence la perception négative des paysans vis-à-vis des engrais chimiques et leur forte attirance pour les ressources organiques riches en nutriments telles que le lombricompost (Raharimalala & Audouin, 2021). De leur côté, les scientifiques ont montré les avantages de l'inoculation de vers de terre dans ces sols pauvres en nutriments : amélioration de la nutrition du riz (Trap *et al.*, 2021), amélioration de la croissance selon les cultivars de riz (Ratsiasika *et al.*, 2021b), résistance aux maladies (Blanchart *et al.*, 2020).

Les effets positifs du lombricompost et des vers de terre sur les cultures ont souvent été démontrés par la littérature (Van Groenigen *et al.*, 2014 ; Mahanayak *et al.*, 2017 ; Blouin *et al.*, 2019 ; Ratsiasika *et al.*, 2021a), des questions clés demeurent toutefois concernant leurs effets sur la résilience climatique des agrosystèmes. C'est l'objet de cette étude.

La question de recherche est la suivante : ***Quel est le potentiel du lombricompost et des vers de terre à améliorer la résilience climatique du riz pluvial ?***

L'objectif principal de cette étude est de comprendre si des pratiques de fertilisation prenant en compte le lombricompost et les vers de terre pourraient améliorer la résilience climatique du riz pluvial. Une expérimentation de 6 semaines en salle d'incubation a donc été lancée dans laquelle nous avons appliqué différentes situations climatiques au riz, en modifiant d'une part la température dans la salle pour appliquer un stress thermique, et d'autre part, le régime hydrique du sol pour appliquer un stress hydrique.

Les objectifs spécifiques de l'étude sont de :

- **OS1** : Déterminer les effets seuls et synergiques du lombricompost et des vers de terre sur la croissance du riz en absence de stress climatique
- **OS2** : Déterminer les effets seuls et synergiques du lombricompost et des vers de terre sur la croissance et la capacité d'adaptation du riz en situation de stress climatique

Deux hypothèses sont émises pour répondre à ces objectifs :

- **H1** : Le lombricompost et les vers de terre, seuls ou ensemble, améliorent la croissance du riz en absence de stress climatique
- **H2** : Le lombricompost et les vers de terre, seuls ou ensemble, améliorent la croissance et la capacité d'adaptation du riz en situation de stress climatique

Nous sommes tout à fait conscients que la compréhension de la résilience climatique ne se limite pas à la croissance de la culture. Toutefois, le comportement du riz face aux stress climatiques lors des premiers stades de développement a toujours un effet déterminant sur le rendement final (Prasad *et al.*, 2008 ; Lipiec *et al.*, 2013 ; Mukamuhirwa *et al.*, 2019). Ainsi, cette expérimentation, encore en phase exploratoire, pourra apporter des éléments de réflexion sur les éventuels potentiels du lombricompost et des vers de terre à améliorer la résilience climatique du riz pluvial.

En termes d'organisation, le présent rapport est divisé en trois parties :

- Partie 1 : Matériels et méthodes
- Partie 2 : Résultats
- Partie 3 : Discussion et perspectives



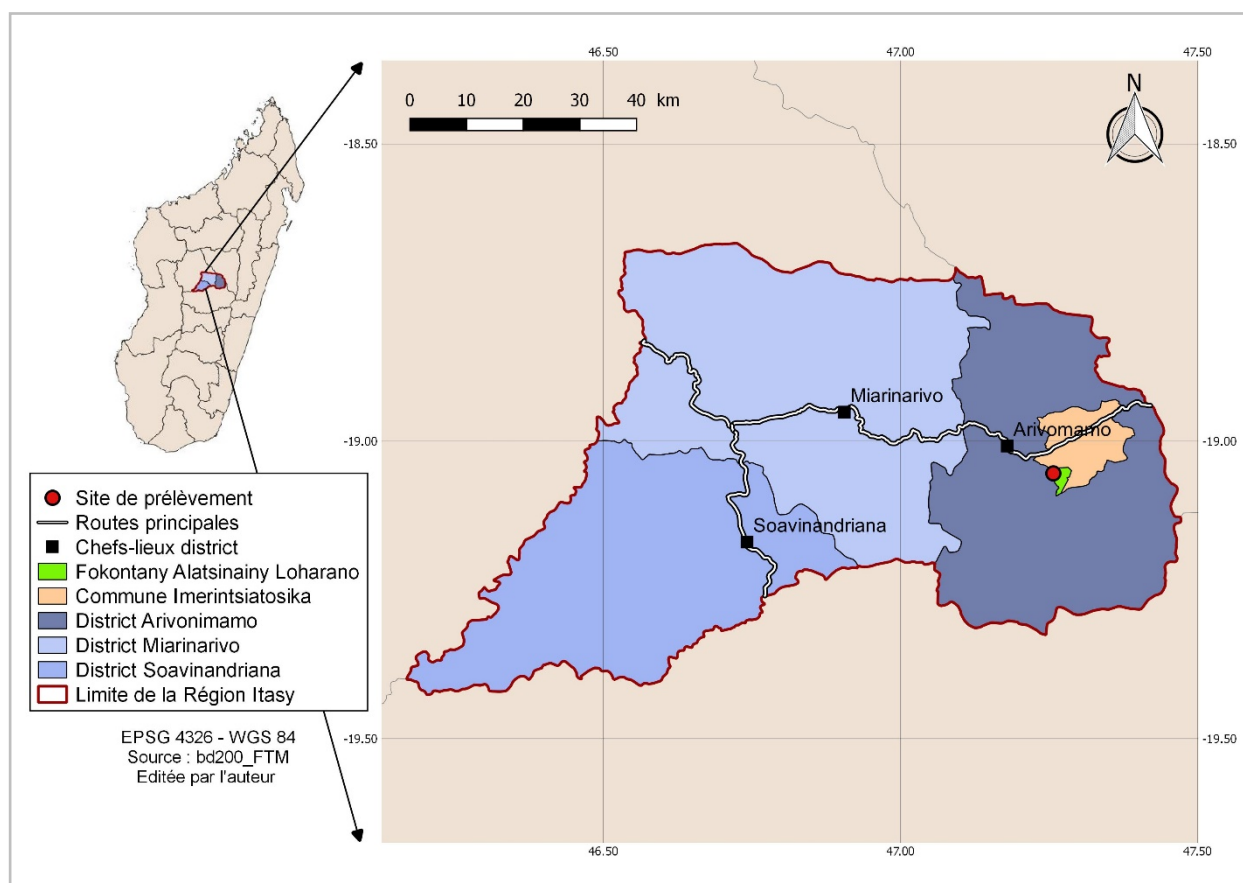
# 1 MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'expérimentation a été réalisée dans la salle d'incubation du Laboratoire des RadioIsotopes à Ampandrianomby. L'avantage avec une expérimentation en salle, c'est que les paramètres environnementaux dans lesquels la culture va se développer peuvent être entièrement contrôlés. En effet, les paramètres tels que la température et le régime hydrique du sol sont difficiles, voire pratiquement impossibles à contrôler dans des expérimentations aux champs.

## 1.1 Matériels utilisés

### 1.1.1 Type de sol

Environ 200 kg de Ferralsol d'Imerintsiatosika a été prélevé à l'*angady* sur une profondeur de 0-15 cm. Le site de prélèvement du sol est situé dans la Région Itasy, District Arivonimamo, Commune rurale Imerintsiatosika, Fokontany Alatsinainy Loharano. La figure 1 montre la localisation du site de prélèvement du sol (latitude : 19°05'40''S ; longitude 47°25'65''E ; altitude : 1296 m).



**Figure 1 :** Carte de localisation du site de prélèvement du sol

Ce site de prélèvement est caractérisé par un sol de défriche non cultivé depuis plusieurs années. Les analyses physico-chimiques du sol de ce site de prélèvement ont déjà été effectuées lors d'une étude antérieure (Raminoarison, 2021). Ces analyses ont montré un pH très acide (pH eau = 4,7)

et une faible capacité d'échange cationique ( $CEC = 1,73 \text{ cmol}^+.\text{kg}^{-1}$ ). Une faible teneur en C total ( $C \text{ total} = 29,3 \text{ g.kg}^{-1}$ ) et en N total ( $N \text{ total} = 2,07 \text{ g.kg}^{-1}$ ) ainsi qu'une très faible teneur en P échangeable ( $3,76.10^{-3} \text{ g.kg}^{-1}$  de P Olsen pour  $1,43 \text{ g.kg}^{-1}$  de P total) ont également été observées. Les analyses granulométriques ont par ailleurs montré une forte proportion en argiles + limons fins (71,3%). Les détails sur les caractéristiques physico-chimiques de ce sol sont présentés en annexe 1.

Une fois séché à l'air, le sol a été légèrement émietté et tamisé à 5 mm pour éliminer les débris végétaux. Puis, il a été soigneusement mélangé de manière à obtenir un sol entièrement homogène.

### 1.1.2 Variété de riz

La variété de riz utilisé dans cette expérimentation est la variété Chhomrong Dhan (*Oryza sativa japonica*), appelée aussi variété « tsipolitra ». C'est la variété de riz pluviale utilisée localement par les paysans d'Imerintsiasosika. C'est une variété d'origine népalaise adaptée aux conditions climatiques des hautes altitudes, connue pour sa forte résistance au froid (Raboin *et al.*, 2013). Elle est très appréciée par les paysans car en plus d'être très productive, cette variété est aussi résistante à la pyriculariose (FOFIFA, 2009). Toutefois, elle a le défaut d'être très sensible à la verse et au stress hydrique (Raboin & Ramanantsoanirina, 2008). Les caractères morphologiques et agronomiques de la variété Chhomrong Dhan sont détaillés en annexe 2.

### 1.1.3 Types de fertilisants organiques

Deux types de fertilisant organique ont été utilisés dans cette expérimentation :

- Le **fumier traditionnel** : collecté auprès d'un agriculteur d'Imerintsiasosika, constitué essentiellement d'un assemblage de déjection bovine et de litière végétale (paille, balle de riz, etc.), accumulé dans un parc extérieur rudimentaire dépourvu de toiture.
- Le **lombricompost** : fabriqué par la coopérative TATA, produit à partir de la décomposition d'un mélange de fumier de ferme et de divers résidus végétaux par le vers de terre *Eisenia foetida*.

Ces fertilisants ont été séchés et broyés avant d'être utilisés pour l'expérimentation. Le tableau ci-après montre leurs compositions chimiques.

**Tableau 1** : Composition chimique des fertilisants organiques utilisés pour l'expérimentation

Fertilisants organiques	C%	N%	P%	K%	Ca%	Mg%
Fumier traditionnel	22,44	1,13	0,27	0,29	0,28	0,23
Lombricompost	23,13	2,00	0,37	1,71	0,76	0,38

Source : Raminoarison, 2021

### 1.1.4 Espèce de vers de terre

Le ver de terre utilisé pour cette expérimentation appartient à l'espèce *Pontoscolex corethrurus* (Rhinodrilidae) connue localement sous le nom de *kankamena* (cliché 1). C'est une espèce

endogée qui vit dans le sol où elle consomme de grandes quantités de sol afin d'en assimiler une partie de la matière organique. Elle est abondante dans toutes les régions de Madagascar car elle est capable de vivre dans un éventail exceptionnellement large d'environnements pédoclimatiques (Razafindrakoto, 2012). L'espèce est connue pour ses effets positifs sur la disponibilité du phosphore dans le sol (Trap *et al.*, 2021), sur la croissance et la productivité du riz (Ratsiatosika *et al.*, 2021a ; Ratsiatosika *et al.*, 2021b), ainsi que sur la résistance du riz face à la pyriculariose. (Blanchart *et al.*, 2020).



Cliché 1 : *Pontoscolex corethrurus* ou *kankamena*

Une fois collectés, les individus de *P. corethrurus* ont été conservés dans une bassine remplie du sol prélevé à Imerintsiatosika et arrosée régulièrement. Avant inoculation, les vers de terre ont été rincés 2 fois à l'eau.

## 1.2 Dispositif expérimental

### 1.2.1 Facteurs étudiés

Dans cette expérimentation, trois principaux facteurs ont été étudiés :

- Le type de fertilisant organique
- L'inoculation de vers de terre
- Les situations climatiques

#### 1.2.1.1 Type de fertilisant organique

Dans ce facteur, deux modalités ont été testées : un apport de fumier traditionnel en tant que témoin représentant la pratique paysanne (**F**) et un apport de lombricompost (**L**). Ces fertilisants ont été apportés à raison de 12,06 g/pot, i.e. 6 t/ha, correspondant au double de la dose moyenne apportée par les paysans des hautes terres sur le riz pluvial, qui est de 3 t/ha (SECURE, 2020). Avant le

semis du riz, cette quantité a été mélangée soigneusement de manière homogène dans une bassine avec 1,5 kg de sol sec avant d'être mise dans chaque pot.

**NB :** Au lieu d'opter pour un témoin sans apports de fertilisant, c'est le fumier traditionnel qui a été utilisé comme témoin car il est conseillé de toujours associer l'inoculation de vers de terre à un apport organique afin de favoriser le développement des vers (Lavelle *et al.*, 2001). D'autre part, il est aussi important de comparer le lombricompost avec le fertilisant traditionnel des agriculteurs.

### **1.2.1.2 Inoculation de vers de terre**

Dans ce facteur, deux modalités ont été étudiées : une modalité témoin sans inoculation de vers de terre (V-) et une modalité avec inoculation de vers de terre (V+). Les inoculations de vers de terre ont été effectuées à raison de 3 individus/pot (i.e. 150 individus/m<sup>2</sup>), correspondant à la gamme de densités de vers de terre rencontrée dans les Ferralsols malgaches en conditions favorables (Rakotomanga *et al.*, 2016). Le poids des vers de terre inoculés dans chaque pot était en moyenne de  $1,38 \pm 0,23$  g. Les inoculations ont été effectuées à la date de germination, c'est-à-dire, 6 jours après le semis du riz.

### **1.2.1.3 Situations climatiques**

Différentes situations climatiques ont été établies en modifiant d'une part la température dans la salle, et d'autre part, le régime hydrique du sol.

#### **❖ Température dans la salle :**

Deux modalités de température ont été adoptées : une température normale (TN) et une température incluant un stress thermique de 2 semaines (TS). Ainsi, l'expérimentation s'est déroulée en deux temps :

- Dans un premier temps (du 27/04/2022 au 08/06/2022), l'expérimentation a été réalisée en condition de température normale, dans laquelle le choix des températures jour/nuit est basé sur les conditions climatiques courantes à Imerintsiasika. Tout au long des 6 semaines d'expérimentation, la température jour/nuit a été de 26/18°C, correspondant à la température maximale moyenne diurne et nocturne à Imerintsiasika en période culturale (de novembre à mars). La température normale (TN) qui a été adoptée n'est donc pas très loin du protocole standard proposé par Köhl (2015), notamment une température jour/nuit de 26/20°C.
- Dans un deuxième temps (du 22/06/2022 au 03/08/2022), un stress thermique temporaire d'une durée de 2 semaines a été infligé au riz. Ainsi, pendant les 2 premières semaines d'expérimentation, la température jour/nuit est d'abord restée à 26/18°C. Puis, durant les 2 semaines qui suivirent, la température jour a été augmentée de 5°C. Le riz a donc été sous une température jour/nuit de 31°C/18°C. Selon Yoshida (1973), 31°C est la température limite au-dessus de laquelle la croissance du riz serait entravée. De plus, cette température correspond bien au stress thermique susceptible d'être observé actuellement sur les Hautes Terres de Madagascar. Quant aux 2 dernières semaines d'expérimentation, la température jour/nuit a été rétablie à 26°C/18°C.

Le tableau ci-après résume les températures dans la salle tout au long des 6 semaines d'expérimentation pour ces deux modalités de température.

**Tableau 2** : Température dans la salle d'incubation selon la modalité de température

Semaine	1	2	3	4	5	6
TN (T° jour/nuite)	26/18°C	26/18°C	26/18°C	26/18°C	26/18°C	26/18°C
TS (T° jour/nuite)	26/18°C	26/18°C	31/18°C	31/18°C	26/18°C	26/18°C

*Les 2 cellules colorées en orange représentent les deux semaines de stress thermique*

Notons que la température nuit a été déclenchée à partir de 17h du soir et arrêtée à 5h du matin (soit une durée de 12h). La température jour n'a par contre été déclenchée qu'à partir de 7h du matin pour laisser augmenter progressivement la température dans la salle et d'éviter ainsi une augmentation brusque de la température. La température dans la salle était contrôlée grâce à un climatiseur réversible capable de faire du chaud ou du froid, selon les besoins.

#### ❖ Régime hydrique du sol :

En modifiant la fréquence d'arrosage des pots, trois niveaux de régime hydrique ont été étudiés :

- Humidité optimale du sol, sans stress (**H100**) : l'humidité du sol a été maintenue à 100% de la capacité au champ (Cc) en arrosant quotidiennement les pots tout au long de l'expérimentation.
- Léger stress hydrique (**H75**) : le sol a été humecté à 100% de la Cc, puis laissé sans arrosage jusqu'à ce que son humidité atteigne 75% de la Cc. Le sol a ensuite été réhumecté à 100% de la Cc, et l'opération est répétée jusqu'à la fin des 6 semaines d'expérimentation.
- Fort stress hydrique (**H50**) : le sol a été humecté à 100% de la Cc, puis laissé sans arrosage jusqu'à ce que son humidité atteigne 50% de la Cc. Le sol a ensuite été réhumecté à 100% de la Cc, et l'opération est répétée jusqu'à la fin des 6 semaines d'expérimentation.

Notons que les 6 semaines d'expérimentation ont été comptées à partir de la date de germination du riz (6 jours après le semis) et les stress hydriques n'ont été déclenchés qu'à partir de cette date. Ainsi, l'humidité du sol a été maintenue à 100% de la Cc pour tous les pots entre la date de semis et la date de germination du riz. L'humidité du sol par rapport à la Cc a été suivie dans le temps en pesant quotidiennement tous les pots (détails du calcul présentés en annexe 3).

À partir de ces deux modalités de température et de ces trois modalités de régime hydrique, six situations climatiques ont été adoptées :

- TN/H100 : situation sans stress climatique (témoin)
- TS/H100 : situation avec stress thermique, sans stress hydrique
- TN/H75 : situation sans stress thermique, avec un léger stress hydrique
- TS/H75 : situation avec stress thermique, combiné à un léger stress hydrique
- TN/H50 : situation sans stress thermique, avec un fort stress hydrique
- TS/H50 : situation avec stress thermique, combiné à un fort stress hydrique

### 1.2.2 Mise en pot

Trois graines de riz ont été semées dans des pots en plastiques de 16 cm de diamètre contenant 1,5 kg de sol (cliché 2a). Le fond de chaque pot a été perforé de quelques trous d'environ 5 mm de diamètre pour faciliter la circulation de l'eau (cliché 2b), puis recouvert au-dessus par une fine maille en nylon pour empêcher les vers de terre de s'échapper et aussi pour réduire les pertes de sol (cliché 2c). Pour éviter que les vers de terre ne s'échappent vers le haut, un ruban scratch adhésif a été installé sur les bords des pots (cliché 2d).



**Cliché 2 : Design des pots utilisés pour l'expérimentation**

*(a) Graines de riz semées à environ 1 cm de profondeur. (b) Trous placés au fond des pots pour faciliter la circulation de l'eau. (c) Fine maille en nylon pour empêcher les vers de terre de s'échapper à travers les trous. (d) Ruban scratch (jaune) installé sur le bord des pots pour empêcher les vers de terre de s'échapper vers le haut*

À l'issue de la combinaison des différents facteurs, notamment 2 modalités pour le facteur « type de fertilisant organique », 2 modalités pour le facteur « inoculation de vers de terre », 6 modalités (soit 2 modalités de température et 3 modalités de régime hydrique du sol) pour le facteur « situations climatiques », et en effectuant 3 répétitions ; 90 pots ont été mis en place au total, soit 45 pots par série de température.

### 1.2.3 Configurations dans la salle

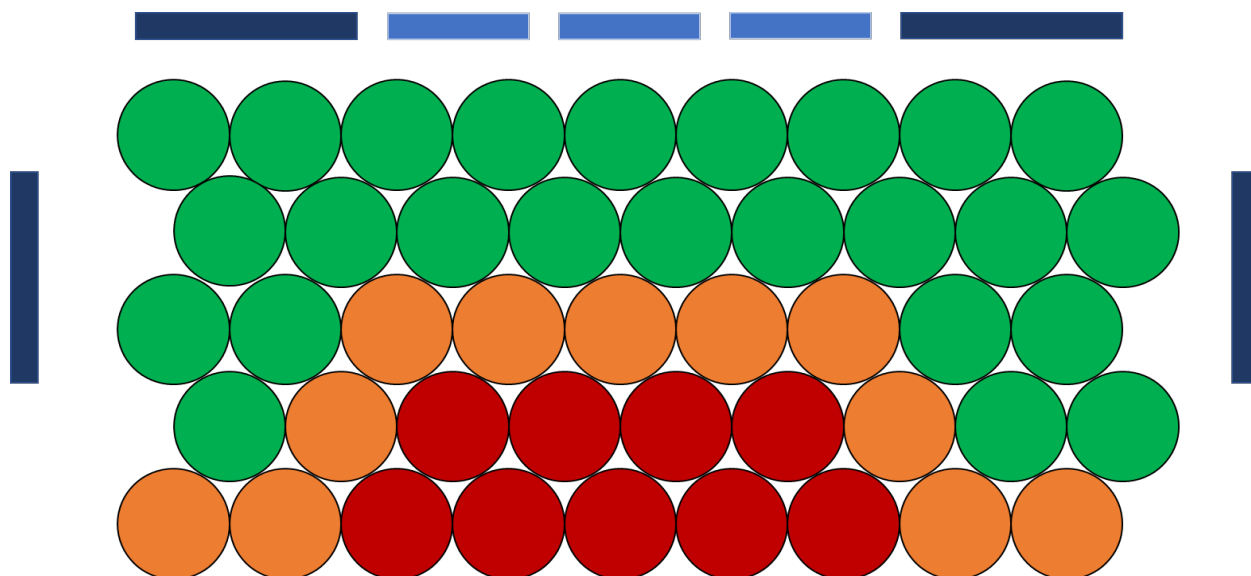
Pour chaque série de température, les 45 pots ont été disposés aléatoirement en 5 lignes et 9 colonnes sur une estrade installée dans la salle d'incubation (cf. cliché 3 & figure 2). Quatre lampes LED de 8000 lumens et trois autres lampes LED de 4000 lumens ont été installées sur les murs de la salle pour éclairer les pots (cliché 3). Les lampes ont été allumées de 6h du matin à 18h du soir,



correspondant à une photopériode de 12h. Face à une éventuelle hétérogénéité de la répartition de la lumière, tous les pots ont été déplacés quotidiennement de manière à ce que chaque pot change de ligne tous les jours et change de colonne tous les 5 jours. Les données climatiques tout au long de l'expérimentation ont été recueillies par une station climatique (*WatchDog Series Weather Stations, USA*) posée sur l'estrade et déplacée également quotidiennement avec les pots. Selon Köhl (2015), l'intensité lumineuse PFFD (*Photosynthetic Photon Flux Density*) minimale nécessaire pour faire pousser du riz est de  $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , mais la valeur la plus appropriée pour sa croissance est comprise entre  $500$  et  $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Pour notre cas, l'intensité lumineuse reçue par les pots variait en fonction de leurs positions par rapport aux lampes. Lorsqu'ils étaient placés suffisamment près des lampes (représenté par les pots colorés en vert de la figure 2), l'intensité lumineuse moyenne reçue était restée à un niveau convenable de  $535,74 \pm 68,94 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Lorsqu'ils étaient placés un peu plus loin (représenté par les pots colorés en orange de la figure 2), l'intensité lumineuse reçue était légèrement inférieure à la valeur recommandée, avec une moyenne de  $439,03 \pm 23,14 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Lorsqu'ils étaient placés à une position beaucoup plus éloignée (représenté par les pots colorés en rouge de la figure 2), l'intensité lumineuse moyenne reçue était de  $306,06 \pm 40,12 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Toutefois, vu que tous les pots ont été déplacés quotidiennement, le riz a pu quand même se développer sous une intensité lumineuse convenable dans la plupart du temps, avec une moyenne pondérée de  $466 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Concernant l'humidité relative de l'air dans la salle, elle a été en moyenne de  $65,5 \pm 11,49 \%$ , sachant qu'elle doit être comprise entre 50 et 80 % pour avoir une croissance normale du riz (Köhl, 2015).



**Cliché 3 :** Disposition des pots dans la salle

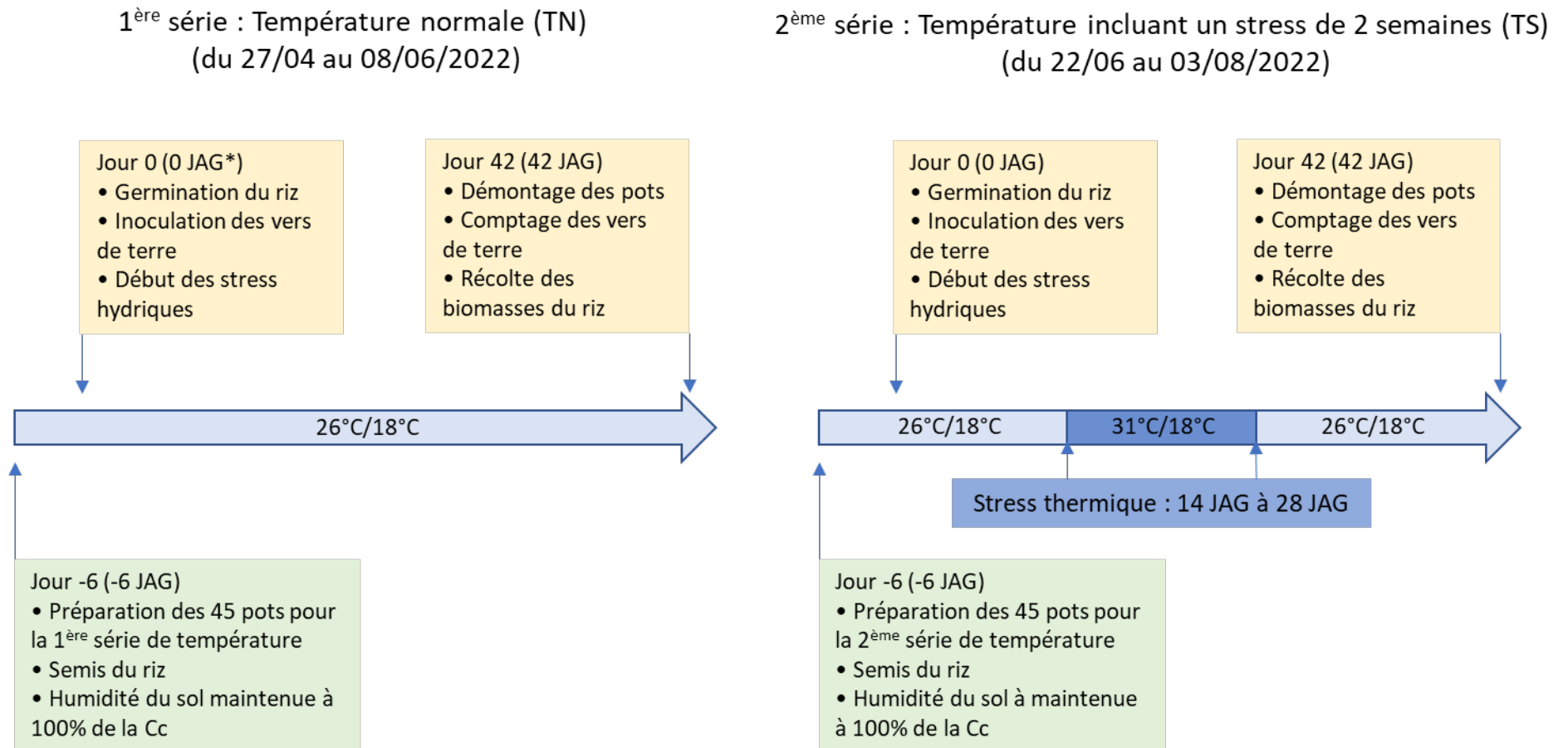


**Figure 2 :** Schéma illustrant la disposition des pots dans la salle (vue de dessus)

*Les rectangles colorés en bleu foncé représentent les lampes LED de 8000 lumens et ceux colorés en bleu clair représentent les lampes LED de 4000 lumens. Les cercles colorés en vert représentent les pots exposés à une intensité lumineuse moyenne de  $535,74 \pm 68,94 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , ceux colorés en orange représentent les pots exposés à une intensité lumineuse moyenne de  $439,03 \pm 23,14 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , et ceux colorés en rouge représentent les pots exposés à une intensité lumineuse de  $306,06 \pm 40,12 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .*



#### 1.2.4 Schéma récapitulatif du déroulé de l'expérimentation



\*JAG : Jours après germination

## 1.3 Mesures effectuées

### 1.3.1 Avant l'expérimentation

- **Capacité au champ du sol (Cc)** : afin d'établir les différentes modalités de régime hydrique, la capacité au champ a été mesurée. Par définition, la capacité au champ est l'humidité du sol après drainage de l'eau contenue dans les macropores par action de la gravité (de Oliveira *et al.*, 2015). Le calcul de la Cc est effectué à partir de la formule suivante : Ainsi, un échantillon

$$Cc (\%) = (\text{Poids sol frais} - \text{Poids sol sec}) / \text{Poids sol sec} * 100$$

de sol d'environ 300 g a été mis sur une passoire et a été arrosé jusqu'à saturation, puis laissé drainer pendant 2 jours (cliché 4). L'échantillon de sol a ensuite été pesé pour déterminer le poids frais, puis mis à l'étuve à 105°C pendant 24h pour déterminer le poids sec. Les mesures de la capacité au champ du sol ont été effectuées en 6 répétitions. Les résultats des mesures ont montré que la valeur de la capacité au champ de notre sol était de 50 % et que la quantité de fertilisant organique apporté (i.e. 12,06 g/pot) n'affectait pas significativement sa capacité au champ (cf. paragraphe 2.1 du chapitre 2).



Cliché 4 : Sol saturé en eau laissé drainer sur une passoire

### 1.3.2 Au cours de l'expérimentation

- **Humidité du sol** : l'humidité du sol (en % de la Cc) de chaque pot tout au long de l'expérimentation a été suivie en pesant quotidiennement les pots (détails du calcul présentés en annexe 3).
- **Hauteur et nombre de talles des plants de riz** : la hauteur et le nombre de talles des plants de riz ont été mesurés 2 fois par semaines (chaque mardi et chaque vendredi) tout au long des 6 semaines d'expérimentation. 12 mesures ont donc été effectuées en tout.

### 1.3.3 À la fin de l'expérimentation

- **Biomasse aérienne (BA) et biomasse racinaire (BR) :** au moment de démonter les pots, les parties aériennes des plants de riz ont été sectionnées et mises dans des enveloppes. Les parties racinaires ont ensuite été récupérées et rincées soigneusement à l'eau afin d'enlever le reste de sol qui s'y colle, puis ont également été mises dans des enveloppes. Toutes les enveloppes ont ensuite été mises à l'étuve pendant 3 jours à 60°C. Les biomasses sèches aériennes et racinaires ont ainsi été obtenues à l'aide d'une balance. Les biomasses totales (BA+BR) et les ratios BA/BR (BA/BR) ont ensuite été calculés à partir de ces mesures.
- **Nombre de vers survivants et de vers actifs :** lors du démontage des pots, le nombre de vers survivants a été compté, ainsi que le nombre de vers en quiescence<sup>1</sup> (cliché 5). Le nombre de vers actifs, correspondant au nombre de vers survivants n'étant pas entrés en quiescence, a ensuite été déduit (un ver en quiescence étant en effet un ver inactif).



Cliché 5 : Ver de terre en quiescence

Source : ADAF, 2021

## 1.4 Traitements statistiques

Les traitements statistiques ont été effectués de manière à simplifier la compréhension des effets seuls et synergiques du lombricompost et des vers de terre dans chaque situation climatique. Ainsi, une ANOVA à 2 facteurs a été effectuée pour chaque situation climatique afin de tester les effets du type de fertilisant organique et de l'inoculation de vers de terre sur les paramètres de croissance du riz (hauteur, nombre de talles, biomasse végétale, ratio BA/BR). Cette ANOVA a été suivie d'un test de comparaison multiple par paire (Tukey-HSD). Ensuite, pour déterminer la

---

<sup>1</sup> Période comparable à l'hibernation, une phase durant laquelle les vers ralentissent leur activité métabolique en s'enroulant sur elle-même. Cette léthargie a lieu en réponse à des conditions environnementales défavorables.

significativité des différences de croissance entre les situations de stress climatique et la situation sans stress climatique (TN/H100), des tests t de Student ont été réalisés sur chaque traitement.

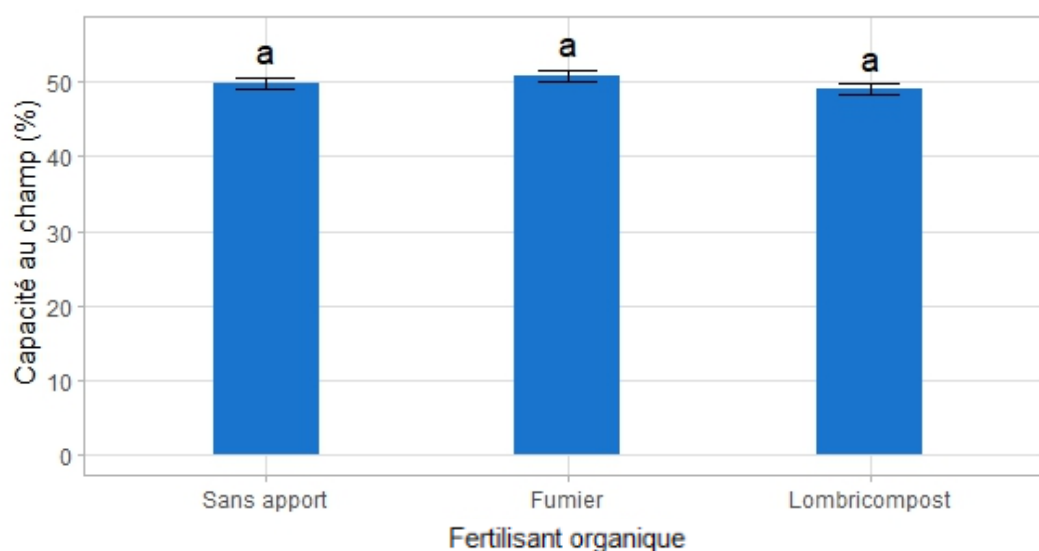
D'autre part, une ANOVA à 1 facteur, suivie d'un test de comparaison multiple par paire (Tukey-HSD), a été effectuée pour tester l'effet du type de fertilisant organique sur la capacité au champ du sol. Une ANOVA à 3 facteurs, toujours suivie d'un test de comparaison multiple par paire (Tukey-HSD), a également été effectuée pour tester les effets du type de fertilisant organique, de la température, et du régime hydrique du sol sur le taux de survie des vers de terre ainsi que sur le taux de vers de terre actifs.

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à partir du logiciel R-4.2.1. Le seuil de significativité a été fixé à 0,05. Chaque ANOVA a été précédée par un test de normalité (test de Shapiro-Wilk) et un test d'homoscédasticité (test de Levene). Lorsque les conditions de l'ANOVA n'étaient pas respectées, les tests ont été réeffectués sur des données transformées soit par  $\log(x)$ , soit par  $\sqrt[3]{x}$ , soit par transformation box-cox.

## 2 RÉSULTATS

### 2.1 Capacité au champ du sol

La figure 3 montre la capacité au champ du sol en situation sans apport de fertilisant organique (en tant que témoin), avec apport de fumier et avec apport de lombricompost. La capacité au champ du sol en situation sans apport de fertilisant organique a été en moyenne de  $49,73 \pm 1,09$  %. L'ANOVA (annexe 4-1) a montré que la quantité de fertilisant organique apportée au sol (i.e. 12,06 g de fumier ou de lombricompost par pot) n'a pas affecté de manière significative sa capacité au champ ( $p$ -value = 0,187). Ainsi, lors des calculs de l'humidité du sol, nous avons arrondi la valeur de la capacité au champ du sol à 50% (cf. annexe 3).

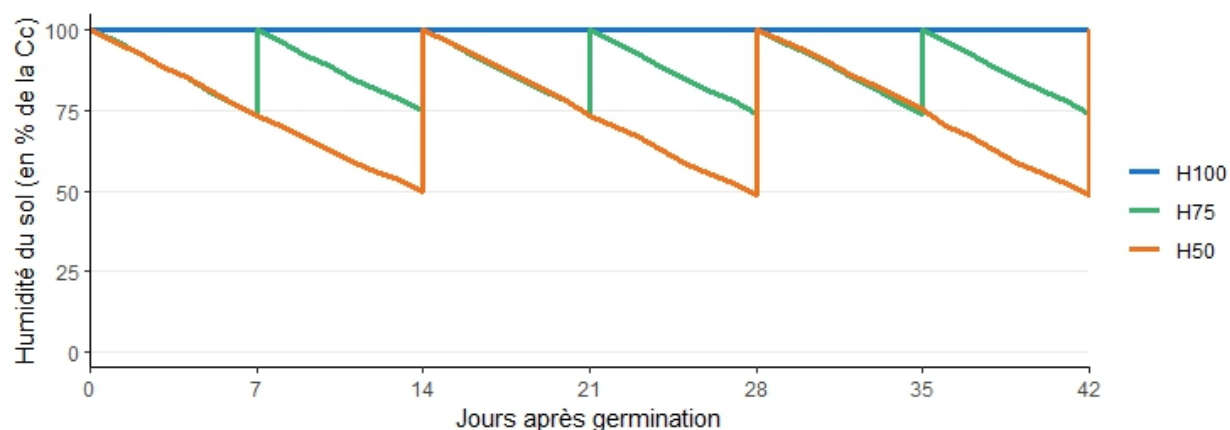


**Figure 3 :** Capacité au champ du sol (n=6)

*Les lettres observées au niveau des barres d'erreurs indiquent la significativité de la différence entre les traitements au seuil de 5%. Les traitements ayant une lettre en commun ne présentent pas de différence significative.*

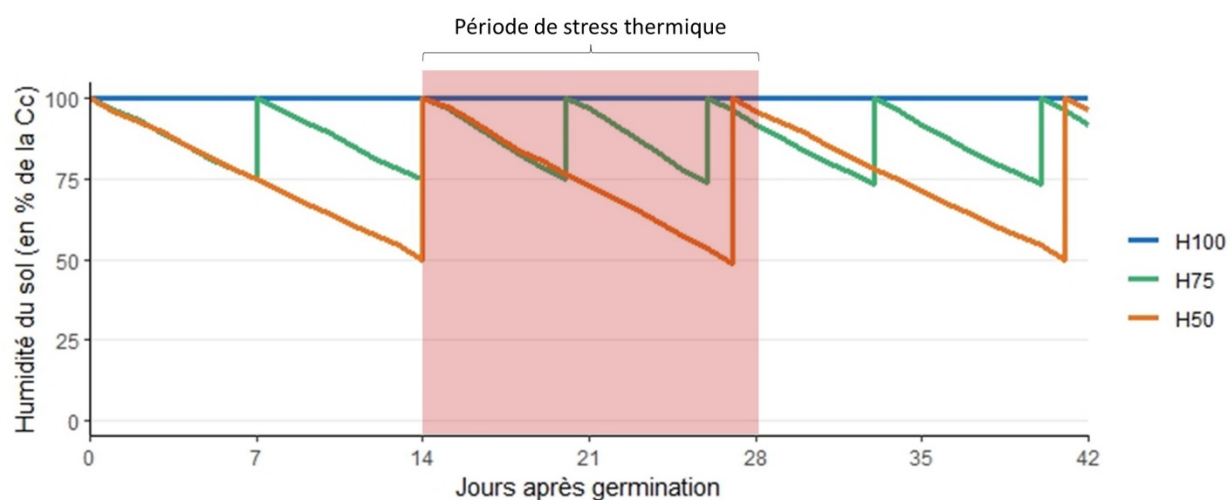
### 2.2 Durées des stress hydriques

La figure 4 montre l'évolution de l'humidité du sol pour chaque modalité de régime hydrique lors de la 1<sup>ère</sup> série de température (température normale). Pour la modalité sans stress hydrique (H100), l'humidité du sol a été maintenue à 100% de la Cc tout au long des 6 semaines d'expérimentation. Pour la modalité de léger stress hydrique (H75), l'humidité moyenne du sol a atteint 75% de la Cc au bout de 7 jours sans arrosage et cette durée est restée la même tout au long des 6 semaines d'expérimentation. Pour la modalité de fort stress hydrique (H50), l'humidité moyenne du sol a atteint 50% de la Cc au bout de 14 jours sans arrosage et cette durée est également restée la même tout au long des 6 semaines d'expérimentation.



**Figure 4 :** Évolution de l'humidité du sol lors de la 1ère série de température (TN)

Lors de la 2<sup>ème</sup> série de température (figure 5), le stress thermique entre le 14<sup>ème</sup> et le 28<sup>ème</sup> jour après germination (JAG) a écourtée la durée des stress hydriques ; la diminution de l'humidité du sol se faisant alors plus rapidement. En effet, durant cette période, l'humidité moyenne du sol a atteint 75% de la Cc au bout de 6 jours sans arrosage et a atteint 50% de la Cc au bout de 13 jours sans arrosage. Par contre, pour les 2 premières semaines (entre 0 et 14 JAG) et les 2 dernières semaines (entre 28 et 42 JAG) sans stress thermique, la durée du stress hydrique était restée la même que lors de la 1<sup>ère</sup> série de température, i.e. une durée de 7 jours sans arrosage pour H75 et une durée de 14 jours sans arrosage pour H50.

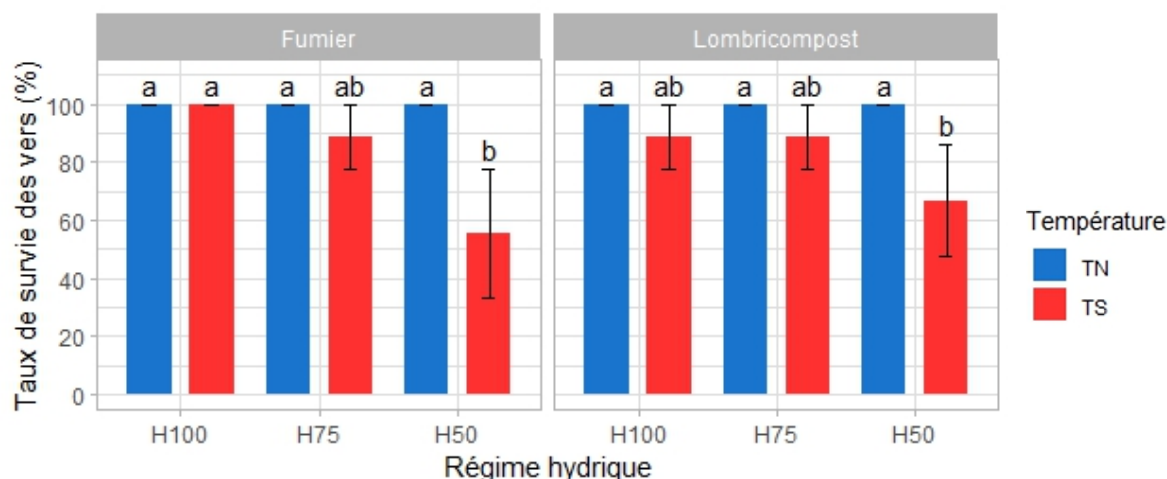


**Figure 5 :** Évolution de l'humidité du sol lors de la 2ème série de température (TS)

## 2.3 Survie et activité des vers de terre à la fin de l'expérimentation

La figure 6 montre le taux de survie des vers de terre selon le fertilisant organique apporté au sol, la température dans la salle et le régime hydrique du sol. Dans de mêmes conditions de température et de régime hydrique, aucune différence significative n'a été observée entre le taux de survie des vers avec le fumier et le taux de survie des vers avec le lombricompost. En effet, le taux de survie des vers n'a pas été affecté de manière significative par le type de fertilisant organique (p-value = 0,658 ; cf. annexe 4-2). Seules la température et l'interaction entre la température et le régime

hydrique ont eu des effets significatifs sur le taux de survie des vers ( $p$ -value = 0,004 pour l'effet de la température ;  $p$ -value = 0,015 pour l'effet de l'interaction ; cf. annexe 4-2). En effet, avec la température TN (température normale), pratiquement tous les traitements ont abouti à un taux de survie de 100%, alors qu'avec la température TS (température incluant un stress thermique de 2 semaines), le taux de survie des vers a eu tendance à diminuer. Toutefois, cette diminution n'a été significative qu'en situation de fort stress hydrique (H50), avec un taux de survie moyen de  $61,1 \pm 13,39$  %.



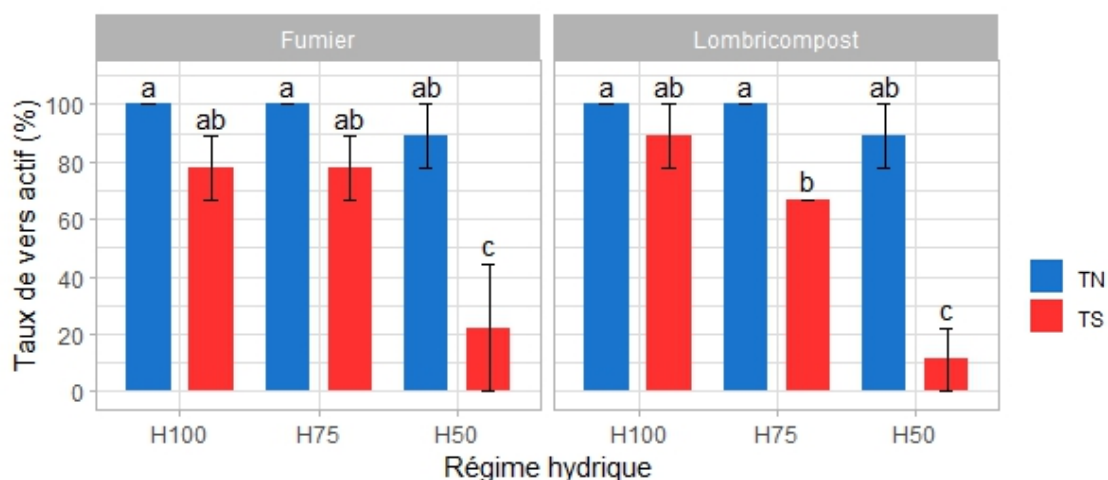
**Figure 6 :** Taux de survie des vers de terre par traitement

*Les lettres observées au niveau des barres d'erreurs indiquent la significativité de la différence entre les traitements au seuil de 5%. Les traitements ayant une lettre en commun ne présentent pas de différence significative.*

Concernant le taux de vers de terre actifs (figure 7), excluant à la fois les vers de terre morts et les vers de terre en quiescence, le type de fertilisant organique n'a toujours pas eu d'effet significatif ( $p$ -value = 0,754 ; cf. annexe 4-2). Par contre, la température, le régime hydrique et l'interaction entre la température et le régime hydrique ont eu des effets significatifs ( $p$ -value < 0,001 pour les deux effets principaux ;  $p$ -value = 0,002 pour l'effet d'interaction ; cf. annexe 4-2). En effet, les stress climatiques, que ce soit le stress thermique ou les stress hydriques, ont eu tendance à faire baisser le taux de vers de terre actifs, sauf pour le cas du stress H75 en température normale (TN) qui est resté à 100%. D'autre part, les stress thermiques et hydriques combinés ont engendré des baisses plus importantes (baisse de 22 à 89%) que le stress thermique seul (baisse de 11 à 22%) ou les stress hydriques seuls (baisse de 0 à 11%). D'ailleurs, les baisses engendrées par le stress thermique seul et les stress hydriques seuls n'ont pas été significatives, contrairement à celles engendrées par les stress thermiques et hydriques combinés (cf. figure 7). Le taux de vers de terre actifs le plus faible a ainsi été observé en situation de stress thermique combiné à un fort stress hydrique (TS/H50) avec seulement  $16,67 \pm 11,39$  % de vers de terre actifs en moyenne. Toutefois,



l'apparition de turricules à la surface de tous les pots ayant reçu une inoculation indique que les vers de terre ont sûrement tous été en activité, du moins à un certain moment de l'expérimentation.



**Figure 7 : Taux de vers de terre actifs par traitement**

*Les lettres observées au niveau des barres d'erreurs indiquent la significativité de la différence entre les traitements au seuil de 5%. Les traitements ayant une lettre en commun ne présentent pas de différence significative.*

## 2.4 Analyse de l'effet du lombricompost et des vers pour chaque situation climatique

Cette partie présentera successivement les effets du lombricompost et des vers de terre sur les différents paramètres de croissance du riz, notamment les hauteurs, les nombres de talles et les biomasses végétales, pour chaque situation climatique. Un tableau récapitulatif de l'ensemble des résultats sera présenté en annexe 5.

### 2.4.1 Hauteurs

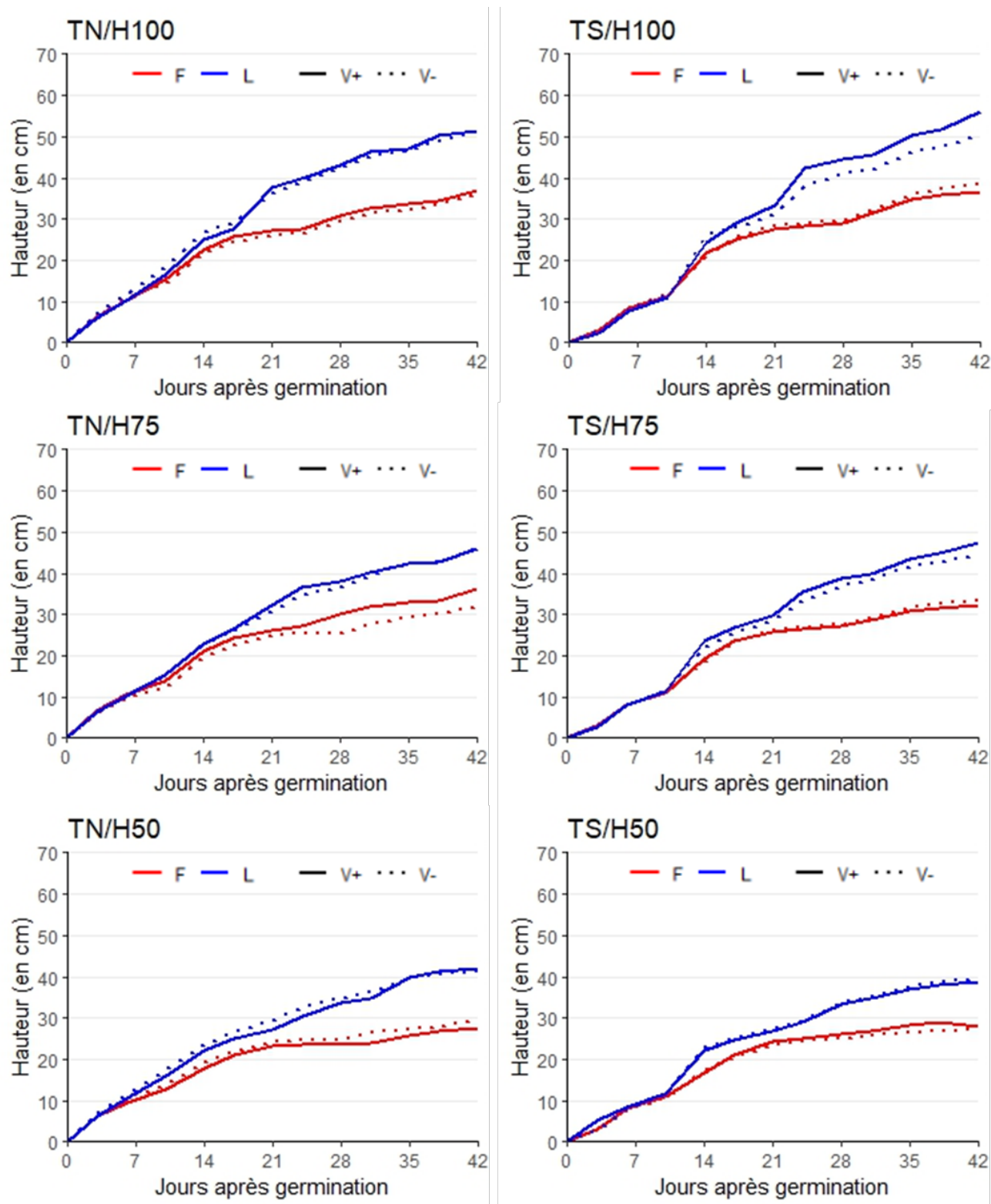
La figure 8 montre les croissances en hauteur du riz pour chaque situation climatique. Les résultats des ANOVA sur les hauteurs du riz sont présentés en annexe 4-3.

En situation TN/H100, la hauteur finale du riz avec le lombricompost ( $51,25 \pm 0,88$  cm) a été significativement supérieure à celle avec le fumier ( $36,58 \pm 0,65$  cm) ( $p$ -value  $< 0,001$ ) et cette différence a été significative à partir du 14<sup>ème</sup> JAG ( $p$ -value = 0,005). Par contre, l'inoculation de vers de terre n'a pas eu d'effet significatif sur la hauteur du riz ( $p$ -value = 0,691).

En situation TS/H100, les hauteurs finales du riz avec le lombricompost sont restées, de manière globale, significativement supérieures à celles avec le fumier ( $p$ -value  $< 0,001$ ), et cette différence a été significative à partir du 14<sup>ème</sup> JAG ( $p$ -value  $< 0,001$ ). Quant à l'effet des vers de terre, il a été significatif, mais seulement avec le lombricompost ( $p$ -value de l'interaction  $< 0,001$ ). La hauteur finale du riz avec le traitement lombricompost avec vers de terre (LV+) ( $56,03 \pm 0,65$  cm) a en effet été significativement plus élevée que celle du traitement lombricompost sans vers de terre (LV-) ( $50,57 \pm 0,59$  cm). Cette différence est expliquée par une augmentation significative



d'environ 5 cm (représentant une augmentation de 8% par rapport à la situation TN/H100) de la hauteur finale du riz avec le traitement LV+ due au stress thermique. Par contre, les hauteurs finales du riz avec les autres traitements n'ont pas été affectées par le stress thermique et sont restées inchangées par rapport à la situation TN/H100.



**Figure 8 :** Croissances en hauteur du riz pour chaque situation climatique

En situation TN/H75, la hauteur finale du riz avec le lombricompost ( $46,20 \pm 0,56$  cm) a été significativement supérieure à celle avec le fumier ( $34,01 \pm 1,41$  cm) ( $p$ -value  $< 0,001$ ) et cette différence a été significative à partir du 21<sup>ème</sup> JAG ( $p$ -value  $< 0,001$ ). Par contre, il n'y a eu aucun effet significatif des vers de terre sur la croissance en hauteur du riz ( $p$ -value =  $0,182$ ). Par ailleurs, par rapport à la situation TN/H100, le stress hydrique H75 a engendré des baisses significatives sur les hauteurs finales du riz des traitements LV- (baisse de 9%), LV+ (baisse de 10%), et FV- (baisse 12%), mais n'a pas engendré de baisse significative sur le traitement FV+.

En situation TS/H75, la hauteur finale du riz avec le lombricompost ( $45,95 \pm 0,65$  cm) est restée significativement supérieure à celle avec le fumier ( $32,67 \pm 0,41$  cm) ( $p$ -value  $< 0,001$ ) et cette différence a été significative à partir du 14<sup>ème</sup> JAG ( $p$ -value =  $0,008$ ). Les vers de terre n'ont pas eu d'effet significatif sur la croissance en hauteur du riz dans cette situation climatique ( $p$ -value =  $0,149$ ). Quant au stress thermique et hydrique combiné (TS/H75), il a engendré des baisses significatives sur les hauteurs finales du riz de tous les traitements, soit une baisse de 8% pour le traitement FV-, une baisse de 13% pour le traitement FV+, une baisse de 12% pour le traitement LV- et une baisse de 8% pour le traitement LV+.

En situation TN/H50, la hauteur finale du riz avec le lombricompost ( $41,63 \pm 0,63$  cm) est restée significativement supérieure à celle avec le fumier ( $28,68 \pm 1,00$  cm) ( $p$ -value  $< 0,001$ ) et cette différence a été significative à partir du 14<sup>ème</sup> JAG ( $p$ -value =  $0,015$ ). Par contre, les vers de terre n'ont pas eu d'effet significatif sur la croissance en hauteur du riz ( $p$ -value =  $0,591$ ). Quant au stress hydrique H50, il a aussi engendré des baisses significatives sur les hauteurs finales du riz de tous les traitements, soit une baisse de 18% pour le traitement FV-, une baisse de 24% pour le traitement FV+, une baisse de 19% pour le traitement LV- et une baisse de 18% pour le traitement LV+.

En situation TS/H50, la hauteur finale du riz avec le lombricompost ( $39,20 \pm 0,21$  cm) est toujours restée significativement supérieure à celle avec le fumier ( $27,57 \pm 0,60$  cm) ( $p$ -value  $< 0,001$ ) et cette différence a été significative à partir du 14<sup>ème</sup> JAG ( $p$ -value =  $0,002$ ). Quant aux vers de terre, leur effet sur la croissance en hauteur du riz a encore été non significatif ( $p$ -value =  $0,925$ ). Par ailleurs, par rapport à la situation TN/H100, le stress thermique et hydrique combiné (TS/H50) a engendré des baisses significatives sur les hauteurs finales du riz de tous les traitements, soit une baisse de 25% pour le traitement FV-, une baisse de 20% pour le traitement FV+, une baisse de 22% pour le traitement LV- et une baisse de 24% pour le traitement LV+.

#### **2.4.2 Nombres de talles**

La figure 9 montre les nombres de talles du riz à la fin de l'expérimentation pour chaque situation climatique. Quant aux résultats des ANOVA sur les nombres de talles du riz, ils sont présentés en annexe 4-4.

En situation TN/H100, le nombre de talles du riz avec le lombricompost ( $10,17 \pm 0,17$ ) a été significativement supérieur à celui avec le fumier ( $4,83 \pm 0,31$ ) à la fin de l'expérimentation ( $p$ -

value < 0,001). Cette différence a été significative à partir du 28<sup>ème</sup> JAG (p-value < 0,001). Par contre, les vers de terre n'ont eu aucun effet significatif sur les nombres de talles du riz (p-value = 1).

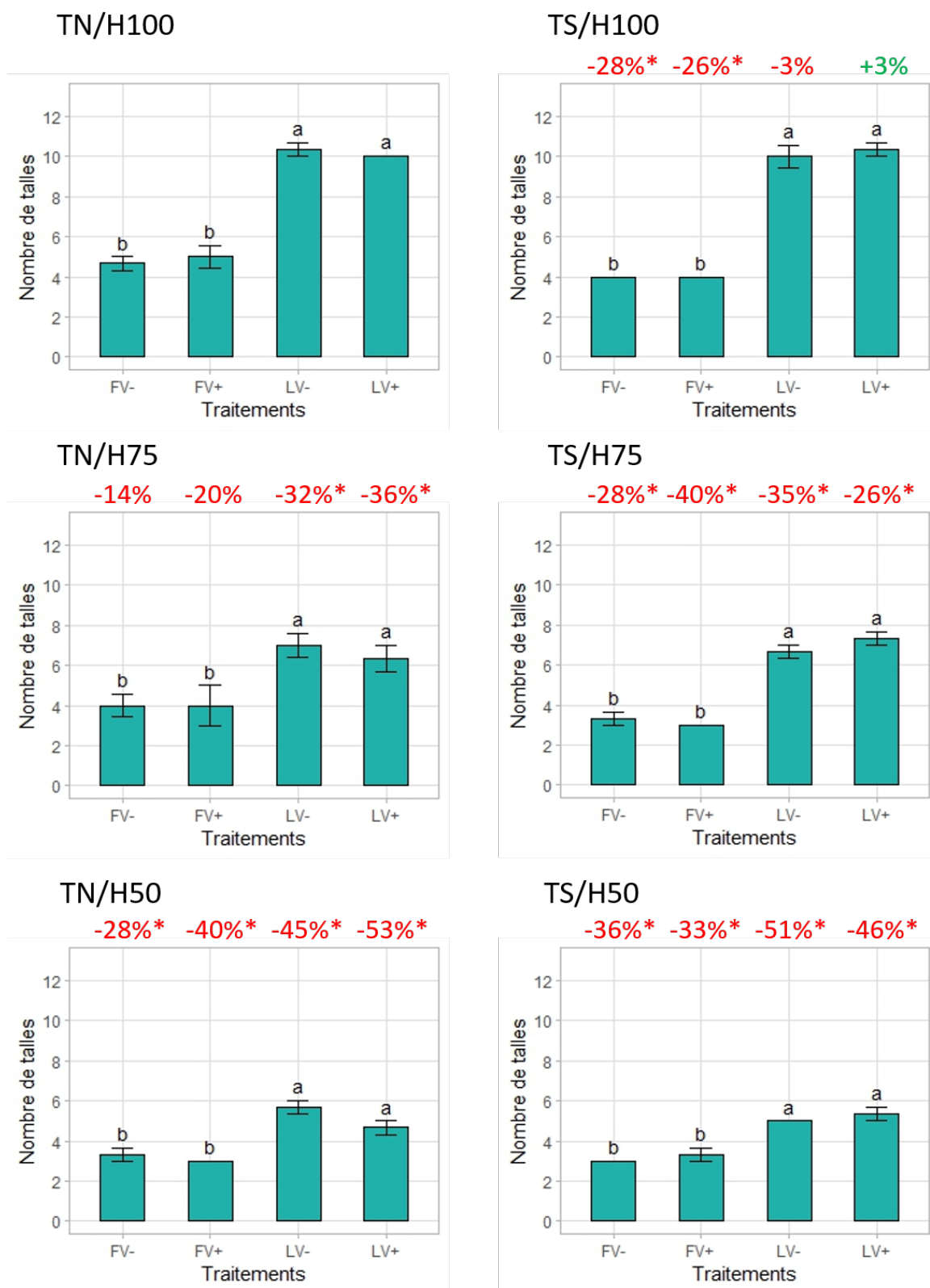
En situation TS/H100, le nombre de talles du riz avec le lombricompost ( $10,17 \pm 0,31$ ) a été significativement supérieur à celui avec le fumier ( $4,83 \pm 0,22$ ) à la fin de l'expérimentation (p-value < 0,001) et cette différence a également été significative à partir du 28<sup>ème</sup> JAG (p-value = 0,008). Il n'y a par contre pas eu d'effet significatif des vers de terre sur les nombres de talles du riz (p-value = 0,438). Les baisses de nombres de talles engendrées par le stress thermique n'ont été significatives que pour les traitements FV- (baisse de 28%) et FV+ (baisse de 26%).

En situation TN/H75, le nombre de talles du riz avec le lombricompost ( $6,67 \pm 0,42$ ) a été significativement supérieur à celui avec le fumier ( $4,00 \pm 0,52$ ), mais seulement à la fin de l'expérimentation (p-value = 0,006). Les vers de terre n'ont toujours pas eu d'effet significatif (p-value = 0,659). Les baisses de nombres de talles engendrées par le stress hydrique H75 n'ont été significatives que pour les traitements LV- (baisse de 32%) et LV+ (baisse de 36%).

En situation TS/H75, le nombre de talles du riz avec le lombricompost ( $7,00 \pm 0,26$ ) a été significativement supérieur à celui avec le fumier ( $3,17 \pm 0,17$ ), mais seulement à la fin de l'expérimentation (p-value < 0,001). Les vers de terre n'ont toujours pas eu d'effet significatif (p-value = 0,659). Le stress thermique et hydrique combiné a engendré des baisses significatives du nombre de talles sur tous les traitements (cf. figure 9 - TS/H75).

En situation TN/H50, le nombre de talles du riz avec le lombricompost ( $5,17 \pm 0,31$ ) a été significativement supérieur à celui avec le fumier ( $3,17 \pm 0,17$ ), mais seulement à la fin de l'expérimentation (p-value < 0,001). Les vers de terre n'ont pas encore eu d'effet significatif (p-value = 0,659). Le stress hydrique H50 a également engendré des baisses significatives du nombre de talles sur tous les traitements (cf. figure 9 – TN/H50).

En situation TS/H50, le nombre de talles du riz avec le lombricompost ( $5,17 \pm 0,17$ ) a encore été significativement supérieur à celui avec le fumier ( $3,00 \pm 0,00$ ) en fin d'expérimentation (p-value < 0,001). Les vers de terre n'ont toujours pas eu d'effet significatif (p-value = 0,659). Le stress thermique et hydrique combiné a engendré des baisses significatives du nombre de talles sur tous les traitements (cf. figure 9 – TS/H50).



**Figure 9 :** Nombres de talles finals du riz pour chaque situation climatique

Les lettres observées au niveau des barres d'erreurs indiquent la significativité de la différence entre les traitements de chaque situation climatique au seuil de 5%. Les traitements ayant une lettre en commun ne présentent pas de différence significative. Les pourcentages négatifs et positifs observés au-dessus de chaque graphe correspondent respectivement aux baisses et aux augmentations observées au niveau des nombre de talles du riz pour chaque traitement par rapport à la situation TN/H100. Les pourcentages munis d'un astérisque (\*) indiquent que la différence par rapport à la situation TN/H100 est significative au seuil de 5%.

### 2.4.3 Biomasses végétales

Dans cette partie, les résultats obtenus sur les biomasses aériennes (BA), les biomasses racinaires (BR), les biomasses totales, et les ratios BA/BR seront présentés successivement.

#### 2.4.3.1 Biomasses aériennes

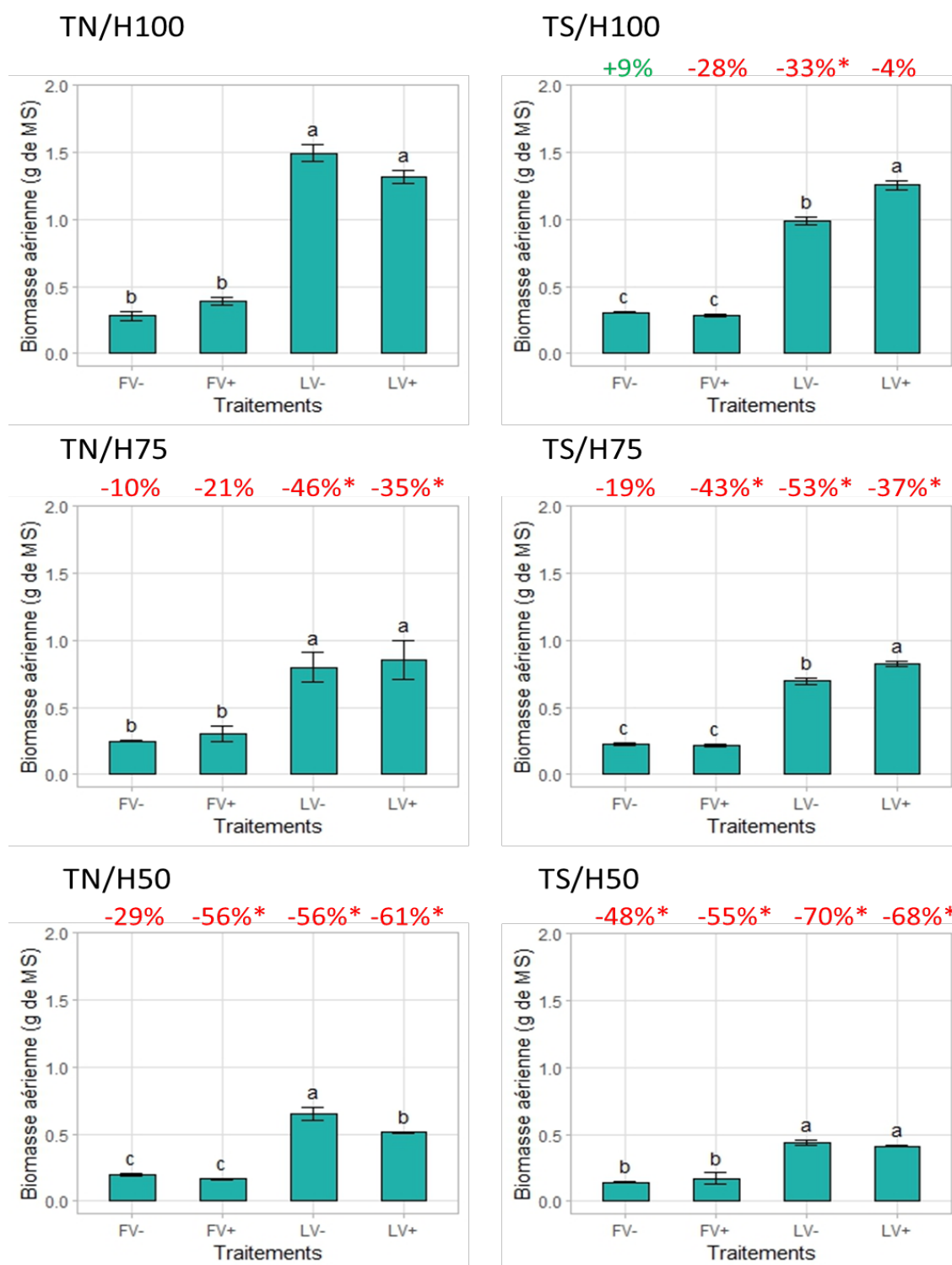
La figure 10 montre les valeurs des biomasses aériennes des plants de riz pour chaque situation climatique. Les résultats des ANOVA sur les biomasses aériennes du riz sont présentés en annexe 4-5.

En situation TN/H100, la biomasse aérienne du riz avec le lombricompost ( $1,41 \pm 0,05$  g de MS) a été 4 fois plus élevée que celle avec le fumier ( $0,33 \pm 0,03$  g de MS), et cette différence a été significative (p-value < 0,001). Par contre, aucune différence significative n'a été observée entre les traitements sans vers (V-) et avec vers (V+) (p-value = 0,461).

En situation TS/H100, les biomasses aériennes du riz avec le lombricompost sont restées, de manière globale, significativement plus élevées que celles avec le fumier (p-value < 0,001). La biomasse aérienne maximale a été observée sur le traitement LV+ avec une moyenne de  $1,26 \pm 0,03$  g de MS. En effet, la biomasse aérienne du traitement LV+, n'ayant reçu qu'une perte de 4% par rapport à la situation TN/H100, a été significativement plus élevée que celle du traitement LV- ( $0,99 \pm 0,03$  g de MS), qui a reçu une perte significative de 33% par rapport à la situation TN/H100. Par contre, cet effet des vers de terre sur la biomasse aérienne n'a pas été observé avec le fumier ; il y a en effet eu une interaction significative entre le type de fertilisant et les vers de terre (p-value < 0,001).

En situation TN/H75, la biomasse aérienne du riz avec le lombricompost ( $0,82 \pm 0,08$  g de MS) a été 3 fois plus élevée que celle avec le fumier ( $0,27 \pm 0,03$  g de MS) et cette différence a été significative (p-value < 0,001). Par contre, aucune différence significative n'a été observée entre les traitements V- et V+ (p-value = 0,508). En outre, le stress hydrique a engendré des pertes significatives sur les biomasses aériennes des traitements LV- (perte de 46%) et LV + (perte de 35%) par rapport à la situation TN/H100.

En situation TS/H75, les biomasses aériennes du riz avec le lombricompost sont restées, de manière globale, significativement plus élevées que celles avec le fumier (p-value < 0,001). D'autre part, l'inoculation de vers de terre a eu un effet significatif sur les biomasses aériennes, mais seulement avec le lombricompost (p-value de l'interaction = 0,011) ; en effet, la biomasse aérienne du traitement LV+ ( $0,82 \pm 0,02$  g de MS) a été significativement plus élevée que celle du traitement LV- ( $0,69 \pm 0,02$  g de MS). Par ailleurs, l'effet du stress thermique et hydrique combiné sur la biomasse aérienne a été significatif pour les traitements FV+ (perte de 43%), LV- (perte de 53%) et LV+ (perte de 37%) par rapport à la situation TN/H100.



**Figure 10 :** Biomasse aérienne du riz pour chaque situation climatique

Les lettres observées au niveau des barres d'erreurs indiquent la significativité de la différence entre les traitements de chaque situation climatique au seuil de 5%. Les traitements ayant une lettre en commun ne présentent pas de différence significative. Les pourcentages négatifs et positifs observés au-dessus de chaque graphe correspondent respectivement aux pertes et aux gains observés au niveau des biomasses aériennes du riz pour chaque traitement par rapport à la situation TN/H100. Les pourcentages munis d'un astérisque (\*) indiquent que la différence par rapport à la situation TN/H100 est significative au seuil de 5%.

En situation TN/H50, les biomasses aériennes du riz avec le lombricompost sont restées, de manière globale, significativement plus élevées que celles avec le fumier ( $p$ -value  $< 0,001$ ). Ici, l'effet des vers de terre a été négatif ; la biomasse aérienne du traitement LV+ ( $0,51 \pm 0,007$  g de MS) a été significativement inférieure à celle du traitement LV- ( $0,65 \pm 0,05$  g de MS). Il n'y a par contre eu aucune différence significative entre les traitements FV+ et FV ( $p$ -value de l'interaction =  $0,013$ ). L'effet du stress hydrique H50 sur les biomasses aériennes a été significatif pour les traitements FV+ (perte de 56%), LV- (perte de 56%) et LV+ (perte de 61%) par rapport à la situation TN/H100.

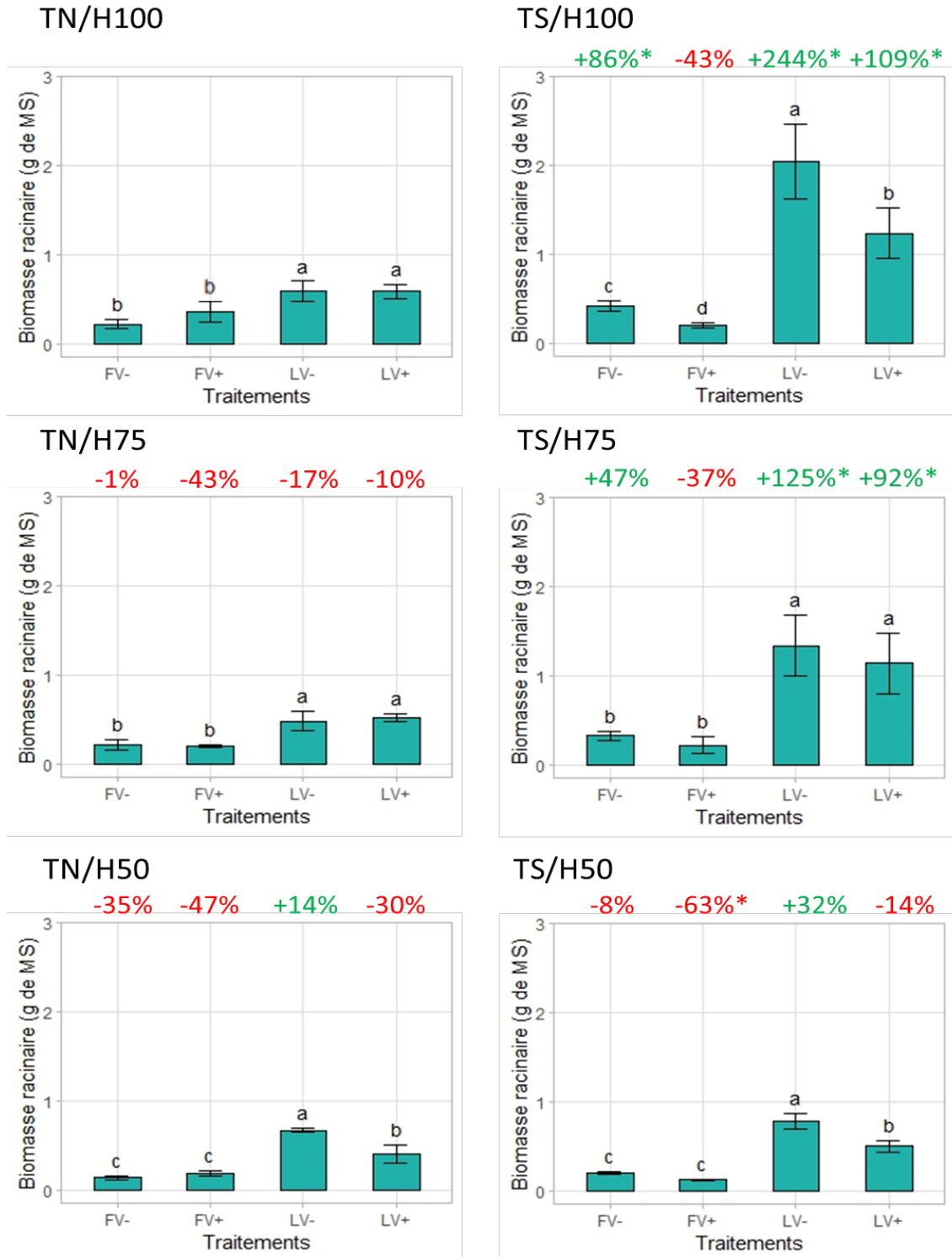
En situation TS/H50, la biomasse aérienne du riz avec le lombricompost ( $0,43 \pm 0,01$  g de MS) est restée significativement plus élevée que celle avec le fumier ( $0,16 \pm 0,02$  g de MS) ( $p$ -value  $< 0,001$ ) et aucun effet des vers n'a été observé ( $p$ -value =  $0,89$ ). Ici, l'effet du stress thermique et hydrique combiné sur la biomasse aérienne a engendré des pertes significatives sur tous les traitements (cf. figure 10 - TS/H50).

#### **2.4.3.2 Biomasses racinaires**

La figure 11 montre les valeurs des biomasses racinaires des plants de riz pour chaque situation climatique. Les résultats des ANOVA sur les biomasses racinaires du riz sont présentés en annexe 4-6.

En situation TN/H100, la biomasse racinaire du riz avec le lombricompost ( $0,59 \pm 0,06$  g de MS) a été 2 fois plus élevée qu'avec le fumier ( $0,29 \pm 0,07$  g de MS) et cette différence a été significative ( $p$ -value =  $0,015$ ). D'autre part, aucune différence significative n'a été observée entre les traitements V- et V+ ( $p$ -value =  $0,49$ ).

En situation TS/H100, le stress thermique a surtout conduit à des gains en biomasse racinaire, sauf pour le traitement FV+ qui a reçu une perte de 43% par rapport à la situation TN/H100. Toutefois, l'effet du stress thermique sur les biomasses racinaires n'a été significatif qu'avec les traitements FV-, LV- et LV+. De manière globale, les biomasses racinaires du riz avec le lombricompost sont restées significativement plus élevées que celles avec le fumier ( $p$ -value  $< 0,001$ ). Il y a également un effet significatif des vers de terre ( $p$ -value =  $0,009$ ) ; la biomasse aérienne du traitement LV- ( $2,04 \pm 0,42$  g de MS), ayant reçu un gain de 244% par rapport à la situation TN/H100, a été significativement plus élevée que celle du traitement LV+ ( $1,24 \pm 0,28$  g de MS), qui a reçu un gain de 109% par rapport à la situation TN/H100. La même tendance a également été observée avec le fumier ; le traitement FV- a conduit à une biomasse racinaire ( $0,42 \pm 0,05$  g de MS) significativement plus élevée que celle du traitement FV+ ( $0,20 \pm 0,02$  g de MS).



**Figure 11 :** Biomasse racinaire du riz pour chaque situation climatique

Les lettres observées au niveau des barres d'erreurs indiquent la significativité de la différence entre les traitements de chaque situation climatique au seuil de 5%. Les traitements ayant une lettre en commun ne présentent pas de différence significative. Les pourcentages négatifs et positifs observés au-dessus de chaque graphe correspondent respectivement aux pertes et aux gains observés au niveau des biomasses racinaires du riz pour chaque traitement par rapport à la situation TN/H100. Les pourcentages munis d'un astérisque (\*) indiquent que la différence par rapport à la situation TN/H100 est significative au seuil de 5%.



En situation TN/H75, la biomasse racinaire du riz avec le lombricompost ( $0,51 \pm 0,05$  g de MS) a été significativement plus élevée que celle avec le fumier ( $0,21 \pm 0,03$  g de MS) ( $p\text{-value} < 0,001$ ) et aucune différence significative n'a été observée entre les traitements V- et V+ ( $p\text{-value} = 0,782$ ). Concernant l'effet du stress hydrique H75, il n'a pas été significatif sur tous les traitements (cf. figure 11 – TN/H75).

En situation TS/H75, la biomasse racinaire du riz avec le lombricompost ( $1,24 \pm 0,22$  g de MS) a été significativement plus élevée que celle avec le fumier ( $0,28 \pm 0,05$  g de MS) ( $p\text{-value} < 0,001$ ) et aucune différence significative n'a été observée entre les traitements V- et V+ ( $p\text{-value} = 0,18$ ). L'effet du stress thermique et hydrique combiné a conduit à une augmentation significative de la biomasse racinaire pour les traitements LV- (gain de 125%) et LV+ (gain de 92%) par rapport à la situation TN/H100.

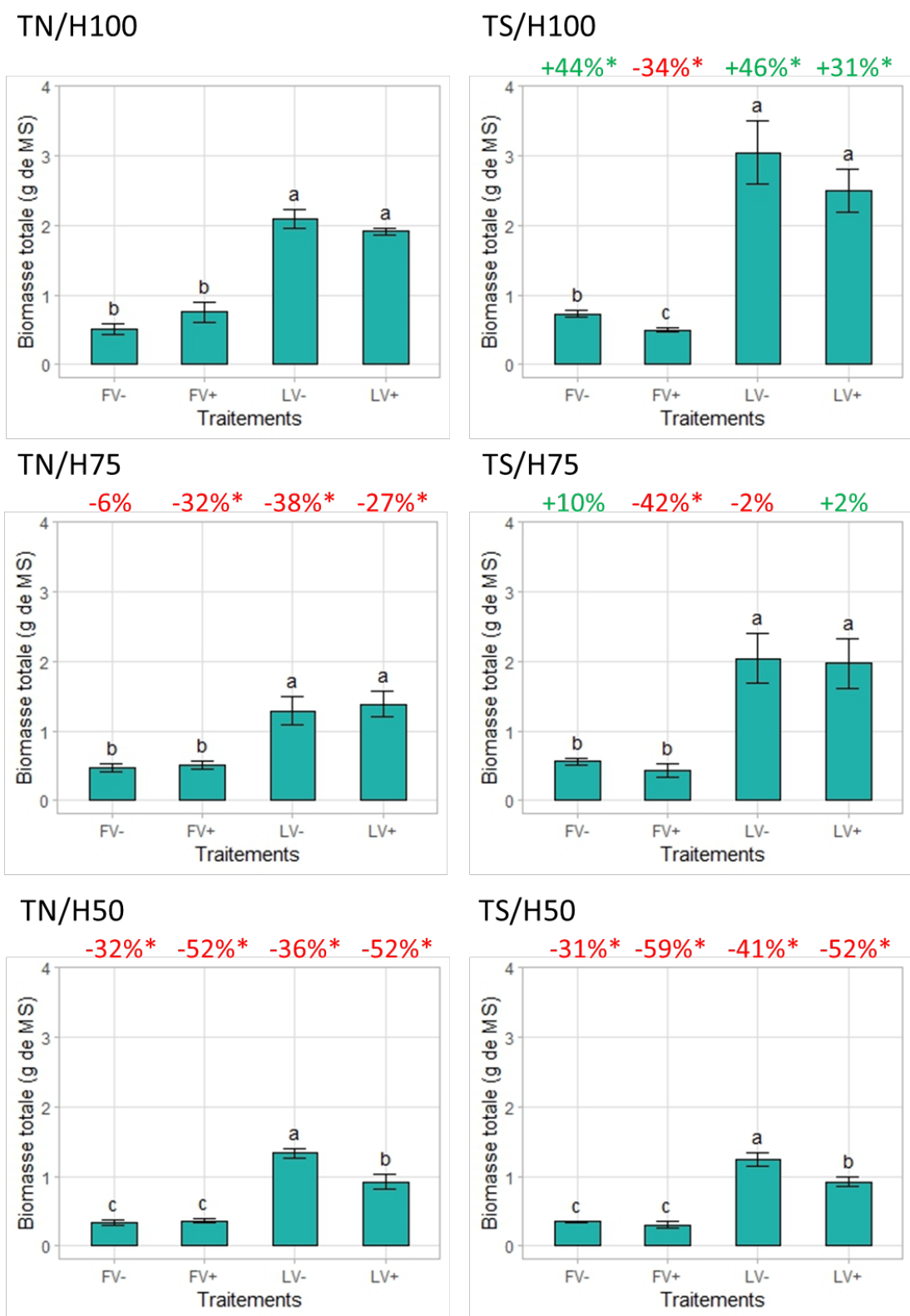
En situation TN/H50, les biomasses racinaires du riz avec le lombricompost sont restées, de manière globale, significativement plus élevées que celles avec le fumier ( $p\text{-value} < 0,001$ ). Comme pour le cas de la biomasse aérienne en situation TN/H50, l'effet des vers de terre a également été négatif pour la biomasse racinaire, mais seulement avec le lombricompost ( $p\text{-value}$  de l'interaction = 0,038). En effet, la biomasse racinaire du traitement LV+ ( $0,41 \pm 0,10$  g de MS) a été significativement plus faible que celle du traitement LV- ( $0,67 \pm 0,20$  g de MS). Par contre, l'effet du stress hydrique H50 sur la biomasse racinaire n'a pas été significatif pour tous les traitements (cf. figure 11 – TN/H50).

En situation TS/H50, les biomasses racinaires du riz avec le lombricompost sont restées, de manière globale, significativement plus élevées que celles avec le fumier ( $p\text{-value} < 0,001$ ). Concernant l'effet des vers de terre, il a été négatif et n'a été observé qu'avec le lombricompost ( $p\text{-value}$  de l'interaction = 0,004). La biomasse racinaire du traitement LV+ ( $0,50 \pm 0,07$  g de MS) a en effet été significativement plus faible que celle du traitement LV- ( $0,78 \pm 0,09$  g de MS). Par contre, l'effet du stress thermique et hydrique combiné sur la biomasse racinaire n'a été significatif que sur le traitement FV+, avec une perte significative de 63%.

#### **2.4.3.3 Biomasses totales**

La figure 12 montre les valeurs des biomasses totales des plants de riz pour chaque situation climatique. Les résultats des ANOVA sur les biomasses totales présentés en annexe 4-7.

En situation TN/H100, la biomasse totale du riz avec le lombricompost ( $1,99 \pm 0,07$  g de MS) a été significativement plus élevée que celle avec le fumier ( $0,63 \pm 0,09$  g de MS) ( $p\text{-value} < 0,001$ ). Par contre, aucune différence significative n'a été observée entre les traitements V- et V+ ( $p\text{-value} = 0,540$ ).



**Figure 12 : Biomasse totale du riz pour chaque situation climatique**

Les lettres observées au niveau des barres d'erreurs indiquent la significativité de la différence entre les traitements de chaque situation climatique au seuil de 5%. Les traitements ayant une lettre en commun ne présentent pas de différence significative. Les pourcentages négatifs et positifs observés au-dessus de chaque graphe correspondent respectivement aux pertes et aux gains observés au niveau des biomasses totales du riz pour chaque traitement par rapport à la situation TN/H100. Les pourcentages munis d'un astérisque (\*) indiquent que la différence par rapport à la situation TN/H100 est significative au seuil de 5%.

En situation TS/H100, les biomasses totales du riz avec le lombricompost sont restées de manière globale, significativement plus élevée que celle avec le fumier ( $p$ -value  $< 0,001$ ). Par ailleurs, une différence significative a été observée entre les traitements FV- ( $0,73 \pm 0,06$  g de MS) et FV+ ( $0,50 \pm 0,03$  g de MS). Par contre, cette différence n'est pas observée avec le lombricompost ( $p$ -value de l'interaction =  $0,049$ ). Par rapport à la situation TN/H100, le stress thermique a engendré des gains significatifs des biomasse totales du riz sur les traitements FV-, LV- et LV+, mais a par contre engendré une perte significative de 34% sur le traitement FV+ (cf. figure 12 – TS/H100).

En situation TN/H75, la biomasse totale du riz avec le lombricompost ( $1,33 \pm 0,13$  g de MS) a été significativement plus élevée que celle avec le fumier ( $0,49 \pm 0,04$  g de MS) ( $p$ -value  $< 0,001$ ) et aucune différence significative n'a été observée entre les traitements V- et V+ ( $p$ -value =  $0,657$ ). Quant au stress hydrique H75, son effet sur la biomasse totale a engendré des pertes significatives sur les traitements FV+ (perte de 32%), LV- (perte de 38%) et LV+ (perte de 27%) par rapport à la situation TN/H100.

En situation TS/H75, la biomasse totale du riz avec le lombricompost ( $2,00 \pm 0,23$  g de MS) a été significativement plus élevée que celle avec le fumier ( $0,50 \pm 0,06$  g de MS) ( $p$ -value  $< 0,001$ ) et aucune différence significative n'a été observée entre les traitements V- et V+ ( $p$ -value =  $0,104$ ). Par rapport à l'effet du stress thermique et hydrique combiné sur la biomasse totale du riz, son effet n'a été significatif que sur le traitement FV+ avec une perte significative de 42% par rapport à la situation TN/H100.

En situation TN/H50, les biomasses totales du riz avec le lombricompost sont restées de manière globale, significativement plus élevée que celles avec le fumier ( $p$ -value  $< 0,001$ ). Par contre, l'effet de l'inoculation de vers de terre a été négatif sur la biomasse totale du traitement avec lombricompost ; la biomasse totale du traitement LV- ( $1,33 \pm 0,06$  g de MS) a en effet été significativement plus élevée que celle du traitement LV+ ( $0,92 \pm 0,10$  g de MS). Cet effet n'a par contre pas été observé avec le fumier ( $p$ -value de l'interaction =  $0,017$ ). Concernant l'effet du stress hydrique H50 sur la biomasse totale du riz par rapport à la situation TN/H100, il a engendré des pertes significatives sur tous les traitements (cf. figure 12 – TN/H50).

En situation TS/H50, les biomasses totales du riz avec le lombricompost sont restées de manière globale, significativement plus élevée que celles avec le fumier ( $p$ -value  $< 0,001$ ) et il y a un effet négatif des vers de terre qui n'est observé qu'avec le lombricompost ( $p$ -value de l'interaction =  $0,047$ ). Quant à l'effet du stress thermique et hydrique combiné, il a engendré des pertes significatives sur tous les traitements (cf. figure 12 - TS/H50).

#### **2.4.3.4 Ratios BA/BR**

La figure 13 montre les ratios BA/BR (biomasse aérienne / biomasse racinaire) du riz pour chaque situation climatique. Les résultats des ANOVA sur les ratios BA/BR du riz sont présentés en annexe 4-8.

En situation TN/H100, le ratio BA/BR du riz avec le lombricompost ( $2,52 \pm 0,30$ ) a été significativement supérieur à celui avec le fumier ( $1,30 \pm 0,21$ ) ( $p\text{-value} = 0,016$ ). Les vers de terre n'ont par contre eu aucun effet significatif ( $p\text{-value} = 0,54$ ).

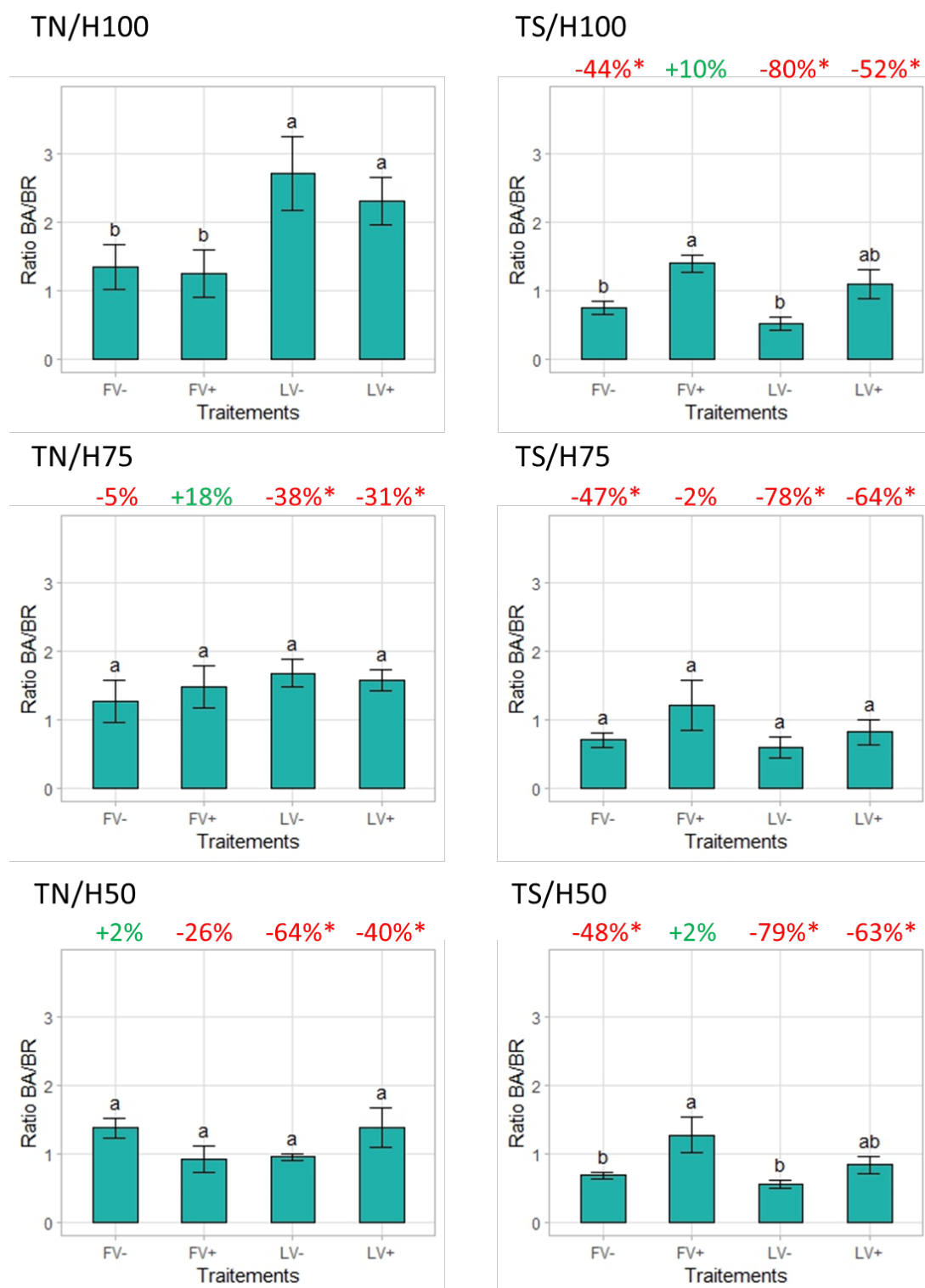
En situation TS/H100, il n'y a pas eu d'effet du type de fertilisant organique sur le ratio BA/BR ( $p\text{-value} = 0,101$ ). Il y a par contre eu un effet significatif des vers de terre ( $p\text{-value} = 0,002$ ). Avec le fumier, le ratio BA/BR du riz en présence de vers ( $1,40 \pm 0,13$ ) a été significativement supérieur à celui en absence de vers ( $0,75 \pm 0,10$ ), et avec le lombricompost, même s'il n'y a pas de différence significative entre les traitements LV+ ( $1,10 \pm 0,21$ ) et LV- ( $0,52 \pm 0,09$ ), le traitement LV+ présente quand même une tendance à la hausse. Le stress thermique, quant à lui, a fait baisser de manière significative les ratios BA/BR du riz de tous les traitements, sauf celui du traitement FV+ (cf. figure 13 – TS/H100).

En situation TN/H75, le type de fertilisant organique et les vers de terre n'ont pas eu d'effet significatif sur le ratio BA/BR du riz. En effet, il n'y a eu aucune différence significative entre les ratios BA/BR des quatre traitements (cf. figure 13 – TN/H75). La moyenne générale du ratio BA/BR était de  $1,51 \pm 0,12$ . Par rapport à l'effet du stress hydrique H75, il n'a été significatif que sur les ratios BA/BR des traitements LV- et LV+, qui ont reçu respectivement des baisses significatives de 38% et de 31% par rapport à la situation TN/H100.

En situation TS/H75, le type de fertilisant organique et les vers de terre n'ont également pas eu d'effet significatif sur le ratio BA/BR du riz. Ainsi, il n'y a eu aucune différence significative entre les ratios BA/BR des quatre traitements (cf. figure 13 – TS/H75) et la moyenne générale était de  $0,84 \pm 0,12$ . Quant à l'effet du stress thermique et hydrique combiné, il a été significatif pour tous les traitements sauf pour le traitement FV+.

En situation TN/H50, il n'y a toujours pas eu d'effet significatif du type de fertilisant organique et des vers de terre sur le ratio BA/BR du riz. Il n'y a donc pas eu de différence significative entre les quatre traitements et la moyenne générale du ratio BA/BR du riz était de  $1,17 \pm 0,10$ . Par rapport à l'effet du stress hydrique H50, il a été significatif sur les ratios BA/BR des traitements LV- et LV+ (cf. figure 13 – TN/H50).

En situation TS/H50, il n'y a pas eu d'effet du type de fertilisant organique sur le ratio BA/BR ( $p\text{-value} = 0,085$ ), mais il y a par contre eu un effet significatif des vers de terre ( $p\text{-value} = 0,015$ ). En effet, avec le fumier, le ratio BA/BR du riz en présence de vers ( $1,29 \pm 0,25$ ) a été significativement supérieur à celui en absence de vers ( $0,70 \pm 0,05$ ), et avec le lombricompost, même s'il n'y a pas de différence significative entre les traitements LV+ ( $0,85 \pm 0,12$ ) et LV- ( $0,57 \pm 0,05$ ), le traitement LV+ présente quand même une tendance à la hausse. Quant au stress thermique et hydrique combiné, il a fait baisser de manière significative les ratios BA/BR de tous les traitements, sauf celui du traitement FV+ (cf. figure 13 – TS/H50).



**Figure 13 : Ratios BA/BR du riz pour chaque situation climatique**

Les lettres observées au niveau des barres d'erreurs indiquent la significativité de la différence entre les traitements de chaque situation climatique au seuil de 5%. Les traitements ayant une lettre en commun ne présentent pas de différence significative. Les pourcentages négatifs et positifs observés au-dessus de chaque graphe correspondent respectivement aux baisses et aux augmentations observées au niveau des ratios BA/BR du riz pour chaque traitement par rapport à la situation TN/H100. Les pourcentages munis d'un astérisque (\*) indiquent que la différence par rapport à la situation TN/H100 est significative au seuil de 5%.

### 3 DISCUSSION ET PERSPECTIVES

#### 3.1 Persistance des vers de terre à la fin de l'expérimentation

Les résultats ont premièrement montré que la survie et l'activité des vers de terre n'étaient pas affectées par le type de fertilisant organique apporté au sol. En effet, le régime alimentaire des vers de terre se compose principalement de matières organiques à divers stades de décomposition (Lee, 1985) ; ils n'ont pas vraiment d'exigence concernant la qualité de la matière organique. Cela est surtout vrai pour *P. corethrurus* ; en effet, Lavelle *et al.* (1987) ont montré qu'elle présentait une très bonne assimilation de la matière organique, même de faible qualité. D'autre part, les résultats ont également montré que lorsqu'il n'y avait pas de stress climatiques (ni hydrique ni thermique), le taux de survie des vers de terre, ainsi que le taux de vers de terre actifs étaient tous de 100%. Cela sous-entend que la quantité de matière organique présente dans le sol, qui représente la nourriture des vers de terre, était suffisante au moins pour la survie et l'activité des vers de terre. Effectivement, Lavelle *et al.* (1981) ont montré que l'espèce *P. corethrurus* pouvait se développer dans des sols présentant une large gamme de teneur en matière organique, allant de 1 à 9,9%. Vu que le sol qui a été utilisé pour l'expérimentation avait déjà à la base à peu près une teneur en matière organique de 5,03%<sup>2</sup>, et qu'en plus, une certaine quantité a été apportée en tant que fertilisant, il est donc fort probable que la quantité de matière organique présente dans le sol a été suffisante pour le développement des vers de terre, d'autant plus que l'expérimentation n'a duré que 6 semaines.

Concernant l'effet des stress climatiques, les résultats ont montré que le stress thermique et les stress hydriques ont, de manière globale, fait baisser la survie et l'activité des vers de terre à la fin de l'expérimentation. Il est bien connu que les vers de terre sont sensibles à la température et à l'humidité du sol (Lee, 1985 ; Edwards & Bohlen, 1996 ; Lavelle et Spain, 2001). Toutefois, les baisses engendrées par les stress climatiques sur le taux de survie des vers de terre et le taux de vers de terre actifs n'ont été significatives qu'en situation de stress thermique et hydrique combiné. Cela sous-entend que la plupart des individus de *P. corethrurus* ont pu tolérer le stress thermique seul (TS/H100) et les stress hydriques seuls (TN/H75 et TN/H50) qui ont été adoptés. Une expérimentation effectuée par Lavelle *et al.* (1987) a montré que *P. corethrurus* avait une croissance positive entre 15°C et 30°C, avec une croissance maximale entre 25°C et 28°C. La température normale (26°C/18°C) qui a été adoptée dans notre expérimentation correspond bien à cette plage de température, ce qui explique pourquoi tous les vers de terre ont survécu à cette température, même en situation de stress hydrique. Quant au stress thermique (31°C/18°C), la température jour de 31°C se trouve juste au-dessus de la limite indiquée par Lavelle *et al.* (1987). De plus, le stress thermique n'a duré que 2 semaines (et seulement pendant la journée). Cela pourrait ainsi expliquer pourquoi les baisses engendrées par le stress thermique seul sur le taux de

---

<sup>2</sup> Calculé à partir du teneur en C total du sol (2,92%) multiplié par le coefficient de conversion de Van Bemmelen (1890) qui est de 1,724

survie des vers et le taux de vers actifs n'ont pas été significatives. Concernant l'humidité du sol, Lavelle *et al.* (1987) affirment que les individus de *P. corethrurus* ne sont pleinement actifs que lorsque l'humidité du sol est bien supérieure à la capacité au champ du sol. Ils ont par contre une aptitude remarquable à résister à la dessiccation et peuvent survivre tant que l'humidité du sol se trouve au-dessus du point de flétrissement (Grant, 1955 ; Caballero, 1979 ; Ayres & Guerra, 1981 ; Lavelle *et al.*, 1987). Vu qu'aucun flétrissement n'a été observé sur les plants de riz tout au long de l'expérimentation, les stress hydriques qui ont été adoptés n'ont donc certainement pas atteint le point de flétrissement. Il est donc logique que tous les vers de terre aient survécu aux stress hydriques, du moins en absence de stress thermique. Par contre, quelques individus sont entrés en quiescence en situation de fort stress hydrique (H50). Selon Lavelle (1971), les vers de terre entrent généralement en quiescence lorsque le potentiel hydrique (pF) du sol est supérieur à 3. Même si nous n'avons pas pu mesurer les potentiels hydriques correspondants aux régimes hydriques qui ont été adoptés, la quiescence des vers de terre en situation H50 nous indique que ce potentiel hydrique a été probablement atteint, d'autant plus que ce stress est largement inférieur à la capacité au champ du sol, qui représente conventionnellement un potentiel hydrique pF=2,5. Toutefois, selon Bachelier (1963) et Bouché (1984), la quiescence est une forme de résistance chez les vers de terre et ils sont capables de retrouver leurs activités lorsque les conditions édaphiques redeviennent favorables. Ainsi, un ver de terre en quiescence à la fin de l'expérimentation n'indique pas forcément qu'il n'a pas été actif tout au long de l'expérimentation, surtout que le sol a été réhumecté à plusieurs reprises. De plus, l'apparition de turricules à la surface des pots prouve que les vers de terre ont tous été en activité à un certain moment de l'expérimentation.

Ainsi, comme Razafindrakoto (2012) l'a déjà évoqué, *P. corethrurus* est capable de vivre dans un éventail exceptionnellement large d'environnements pédoclimatiques. Il s'agit d'une espèce euryèce<sup>3</sup>. Ceci explique aussi pourquoi cette espèce a pu coloniser toutes les terres tropicales humides et est parfois reconnue comme espèces invasives. De plus, pour notre cas, le déplacement des vers de terre a été considérablement restreint puisque l'essai a été réalisé dans des pots assez petits. Alors que dans des conditions réelles sur terrain, les vers de terre sont capables de se déplacer dans des horizons plus profonds pour se protéger des stress climatiques (Fragoso, 1985 ; Lavelle *et al.*, 1987). D'autre part, la quantité de matière organique qui a été apportée au sol a été assez faible (équivalent à un apport de 6 t/ha). Or, un apport de matière organique plus important aurait pu potentiellement aider les vers de terre à résister aux stress climatiques. En effet, un sol riche en matières organiques a un meilleur pouvoir tampon qu'un sol pauvre en matières organiques, et il est donc mieux protégé des variations climatiques (Rabeharisoa, 2004 ; Bot & Benites, 2005 ; Ralaizafisolavivony, 2012 ; Ratsiatosika, 2014).

---

<sup>3</sup> Capable de vivre dans des environnements variés

### **3.2 Effets du lombricompost et des vers de terre sur la croissance du riz en absence de stress climatique**

Les résultats ont montré qu'en absence de stress climatique, le lombricompost a toujours donné une meilleure performance que le fumier sur tous les paramètres de croissance du riz qui ont été mesurés. En effet, la croissance de la plante est principalement influencée par sa nutrition (Ingestad & I. Ågren, 1992). Vu que le lombricompost est nettement plus riche en éléments nutritifs que le fumier (cf. tableau 1), les différences observées au niveau des paramètres de croissance du riz en situation sans stress climatique ne sont pas très étonnantes. De plus, la plupart des éléments nutritifs présents dans le lombricompost sont déjà sous des formes facilement disponibles pour les plantes (Diacono et Montemurro, 2010). Cela est principalement dû à une stimulation des activités microbiennes plus accrue grâce aux turricules produits par les vers de terre lors du processus de compostage (Chaudhary *et al.*, 2004). En effet, l'activité microbienne est le principal facteur qui assure la libération des éléments nutritifs présents dans la matière organique (Doran & Smith, 1987 ; McLatchey & Reddy, 1998). Par ailleurs, la carence en nutriment, faisant partie des stress abiotiques, a pour principale conséquence d'engendrer une réduction de la croissance de la plante (Xiong *et al.*, 2018). Ce qui explique la faible performance du riz avec le fumier par rapport au lombricompost. D'autre part, un point important est à soulever par rapport au ratio BA/BR du riz. Selon la théorie de l'équilibre fonctionnelle, les plantes investissent plus d'énergie dans les organes qui sont responsables de l'acquisition de leurs ressources limitantes (Brouwer, 1963). Si la valeur du ratio BA/BR est faible, cela indique que le riz a eu un fort développement racinaire, et sous-entend que l'organe responsable de l'acquisition des ressources limitantes de la plante est la racine. Les racines ont pour principal rôle d'approvisionner la plante en eau et en éléments nutritifs (Chopart, 2020). Étant donné que l'humidité du sol en situation sans stress climatique a été maintenue à un niveau optimal, la disponibilité des éléments nutritifs est donc le principal facteur qui a influencé le développement racinaire, et qui détermine donc en grande partie la valeur du ratio BA/BR. En effet, un stress dû à une carence en nutriments provoque généralement chez la plante un fort développement racinaire (Kroevoets *et al.*, 2016). Comme pour les autres paramètres, le ratio BA/BR du riz a été plus élevé avec le lombricompost qu'avec le fumier. Cela confirme donc qu'il y a eu plus d'éléments nutritifs disponibles pour la plante avec le lombricompost qu'avec le fumier, et que la plante a investi moins d'énergie dans son système racinaire avec le lombricompost.

D'autre part, aucun effet des vers de terre n'a été observé sur les paramètres de croissance du riz en situation sans stress climatique. Pourtant, le taux de vers de terre actifs a été de 100%. Selon Brown (2004), les vers de terre peuvent améliorer la croissance des plantes à travers cinq principaux mécanismes : (i) le contrôle des ravageurs et des parasites, (ii) la stimulation des symbiotes, (iii) la production de substances régulatrices de croissance similaires aux phytohormones, (iv) la modification de la structure du sol, et (v) l'augmentation de la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol. L'étude de van Groenigen *et al.* (2014) a par ailleurs affirmé que



c'est surtout sur ce dernier mécanisme que les vers de terre agissent sur la croissance des plantes. Ainsi, étant donné l'absence d'effet des vers de terre sur la croissance du riz, la quantité d'éléments nutritifs libérée par les vers de terre sur une période de 6 semaines n'a certainement pas été suffisamment importante par rapport à la quantité d'éléments nutritifs déjà disponibles dans les fertilisants organiques apportés au sol. Effectivement, Brown *et al.* (1999) ont pu montrer que dans des sols argileux (teneur en argile > 30%) suffisamment riches en carbone (teneur en C > 1,5%), l'effet des vers de terre sur l'augmentation de la disponibilité des éléments nutritifs du sol pouvait être dilué par les éléments nutritifs apportés au sol via les fertilisants organiques. Vu que le sol qui a été utilisé dans l'expérimentation était un sol argileux ayant une teneur en carbone total de 2,92% (cf. annexe1), les éléments nutritifs apportés au sol via les fertilisants organiques ont, d'une certaine manière, dû être suffisants pour nourrir le riz sans que l'effet des vers de terre soit visible sur sa croissance, du moins sur une période de 6 semaines. Dans ce cas, l'effet des vers de terre sur l'augmentation de la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol n'a pas été suffisamment fort (et donc pas significatif) et a été masqué par l'effet de la fertilisation. L'effet des vers de terre sur la croissance du riz pourrait toutefois se faire sentir plus tardivement, une fois que les nutriments (sous formes disponibles) apportés au sol via les fertilisants organiques se font plus rares. D'autre part, nous supposons également que les effets des vers de terre en relation avec les quatre autres mécanismes cités précédemment n'ont pas aussi été suffisamment fort pour apporter une amélioration de la croissance du riz.

Ainsi, notre première hypothèse qui suggère que « le lombricompost et les vers de terre, seuls ou ensemble, améliorent la croissance du riz en absence de stress climatique », n'est que partiellement validée, vu que seul l'effet bénéfique du lombricompost a pu être démontré.

### **3.3 Effets du lombricompost et des vers de terre sur la croissance et la capacité d'adaptation du riz en situation de stress climatique**

#### **3.3.1 Situation de stress thermique**

Les résultats ont montré qu'en situation de stress thermique, les performances du riz sont restées meilleures avec le lombricompost qu'avec le fumier sur tous les paramètres de croissance qui ont été mesurés, sauf sur le ratio BA/BR qui n'a pas été influencé par le type de fertilisant organique. Ainsi, l'effet bénéfique du lombricompost sur la croissance du riz, principalement dû à sa richesse en éléments nutritifs, n'a pas été annulé par le stress thermique. Au contraire, plusieurs études ont montré qu'une nutrition adéquate (principalement en azote et en phosphore) était essentielle pour aider les plantes à mieux résister au stress thermique (Heckathorn *et al.*, 1996 ; Waraich *et al.*, 2012 ; Fahad *et al.*, 2016 ; Liu *et al.*, 2019). En effet, les nutriments aident la plante à activer les différents mécanismes d'adaptation nécessaire à l'atténuation des effets des stress abiotiques (Kumari *et al.*, 2022). D'autre part, l'absence d'effet du type de fertilisant organique sur le ratio BA/BR est due non seulement à une réduction de la biomasse aérienne, mais principalement à une importante augmentation de la biomasse racinaire causée par le stress thermique, surtout avec le lombricompost. Les racines, ayant une température de croissance optimale plus basse que les

parties aériennes, sont plus sensibles au stress thermique (Huang *et al.*, 2012). En effet, un stress thermique, même de courtes durées, peut diminuer les niveaux d'absorption et d'assimilation de nutriments au niveau de la racine (Cao *et al.*, 2008 ; Giri *et al.*, 2017). C'est pourquoi, la biomasse racinaire du riz a eu tendance à augmenter en présence de stress thermique. En effet, le développement du système racinaire a un rôle vital dans la récupération au stress thermique (Sailaja *et al.*, 2014). Une croissance accrue de la racine permet non seulement d'assimiler plus de nutriments, mais elle permet aussi à la plante de résister à la chaleur en maintenant un statut hydrique élevé (Sairam *et al.*, 2000). Ainsi, comme l'a déjà évoqué Shrestha *et al.* (2013), même étant plutôt une variété adaptée au froid, la variété Chhomrong Dhan montre également une bonne adaptation au chaud. Toutefois, l'augmentation de la biomasse racinaire du riz n'a pas été significative avec le fumier ; d'une part, car la croissance racinaire, faisant partie des mécanismes d'adaptation au stress thermique, a pu être limitée par la faible nutrition du riz avec le fumier, d'autre part, le riz avec le fumier présentait déjà un développement racinaire élevé (à cause du stress nutritionnel) en situation sans stress climatique.

Par ailleurs, contrairement à la situation sans stress climatique, les vers de terre ont présenté des effets significatifs sur la plupart des paramètres de croissance du riz avec le stress thermique. Le résultat le plus marquant est son effet positif sur le ratio BA/BR du riz. Étant donné que la libération d'éléments nutritifs dans le sol par les vers de terre n'a pas été suffisamment fort pour apporter une amélioration de la croissance du riz en absence de stress, il est peu probable que l'effet des vers de terre observé en situation de stress thermique soit lié à ce mécanisme. Et même si quelques vers de terre n'ont pas survécu au stress thermique, van Groenigen *et al.* (2014) affirment que la dégradation des tissus des vers de terre contribue très peu à la nutrition de la plante, d'autant plus que seulement 5% des vers de terre n'ont pas survécu à la situation TS/H100. Cependant, les contributions des vers de terre à l'amélioration de la croissance des plantes dépassent souvent largement le potentiel qu'ils ont pour améliorer la disponibilité des nutriments. Il existe de très bonnes preuves scientifiques que les interactions entre les vers de terre et les micro-organismes peuvent influencer la croissance des plantes par le biais de divers facteurs biologiques qui ne sont pas liés à la fertilité, par exemple en produisant dans leurs turricules des substances qui favorisent la croissance des plantes et dont l'effet est similaire, voire même égal, à celui des cytokinines, des gibbérellines ou des auxines (Edwards, 2004 ; Kennedy *et al.*, 2007 ; Johnson *et al.*, 2007). Effectivement, la littérature montre qu'en présence de stress thermique, le riz est sujet à un déséquilibre phytohormonal ; notamment une réduction accrue des niveaux de cytokinine, de gibbérelline et d'auxine (Tang *et al.*, 2007 ; Wu *et al.*, 2016 ; Xu *et al.*, 2021). Une attention particulière a été attribuée à la cytokinine dans l'amélioration de la tolérance au stress thermique. Selon Mittler *et al.* (2011), le stress thermique endommage les composants biologiques de la plante, surtout au niveau de la racine, par la production de substances réactives à l'oxygène et la dénaturation des protéines. Une étude a pu montrer que l'application exogène de 6-benzylaminopurine (6-BA), une cytokinine synthétique, pouvait atténuer ces effets négatifs du

stress thermique en augmentant l'activité du système antioxydant de la plante et en accumulant des protéines résistantes aux chocs thermiques, qui agissent comme des couches moléculaires empêchant la dénaturation des protéines sensibles (Mittler *et al.*, 2011 ; Wu *et al.*, 2016 ; Mandal *et al.*, 2022). La cytokinine peut également améliorer la résistance des plantes en réduisant les effets négatifs du stress thermique sur l'activité photosynthétique (Xu *et al.*, 2009 ; Escandón *et al.*, 2016). Ainsi, il est fort probable que les vers de terre (en interaction avec les micro-organismes du sol) ont pu contribuer à l'amélioration de la croissance du riz en situation de stress thermique à travers la production de phytohormones, principalement la cytokinine. D'autre part, la cytokinine, ayant pour principale action de favoriser la croissance des parties aériennes de la plante (en effet, la hauteur et la biomasse aérienne du riz ont été plus élevées en présence de vers de terre), peut aussi avoir pour action de limiter l'élongation racinaire (Schaller *et al.*, 2014). Ceci explique donc pourquoi la biomasse racinaire du riz a été moins importante en présence de vers de terre. Toutefois, l'activité racinaire étant moins impactée par le stress thermique (grâce à l'action de la cytokinine), la réduction de la biomasse racinaire en présence de vers de terre n'a pas eu d'impact négatif sur la croissance du riz. Par ailleurs, l'effet des vers de terre sur la croissance du riz en situation de stress climatique peut aussi être expliqué en partie par l'action des vers de terre sur la structure du sol. *P. corethrurus* joue en effet un rôle majeur dans la formation de la structure du sol en augmentant la proportion de gros agrégats (Blanchart *et al.*, 1999). Par cette action, il favorise l'aération du sol, ainsi que la distribution, le stockage et le drainage de l'eau à travers la structure du sol, protégeant ainsi la racine des variations brusques de température qui interrompent l'absorption des nutriments (Bento *et al.*, 2020). Étant moins exposée au stress thermique, la racine du riz en présence de vers de terre a probablement été plus active et a eu moins besoin de se développer par rapport aux situations sans vers de terre.

Toutefois, les effets bénéfiques des vers de terre sur la croissance du riz en situation de stress thermique n'ont réellement été observés qu'avec le lombricompost. En effet, les effets positifs des vers de terre sur la hauteur et la biomasse aérienne ont été significatifs seulement avec le lombricompost. Et inversement, les vers de terre ont conduit à un impact négatif sur la biomasse totale du riz avec le fumier (en effet, les traitements FV- et FV+ ont présenté une même biomasse aérienne alors que le traitement FV+ a présenté un développement racinaire plus faible), mais pas avec le lombricompost.

### **3.3.2 Situation de stress hydrique**

Les résultats ont montré qu'en situation de stress hydrique, que ce soit en situation TN/H75 ou en situation TN/H50, les performances du riz sont toujours restées meilleures avec le lombricompost qu'avec le fumier, sauf sur le ratio BA/BR. Selon Waraich *et al.* (2011), les nutriments apportés au sol à travers la fertilisation jouent un rôle très important dans l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau de la plante sous une condition d'approvisionnement en eau limitée. Comme il a déjà été évoqué précédemment, les nutriments aident la plante à activer les différents mécanismes nécessaires pour atténuer les effets des stress abiotiques (Kumari *et al.*, 2022). Parmi ces

mécanismes, il y a la biosynthèse de l'acide abscissique (ABA), une phytohormone étroitement liée à la réponse au stress, principalement au stress hydrique (Iqbal *et al.*, 2022). En absence de stress climatique, l'ABA est présente dans la plante à une très faible concentration (Parveen *et al.*, 2021). Mais en période de stress hydrique, une augmentation de la biosynthèse de l'ABA permet à la plante de s'adapter au stress hydrique, en agissant principalement sur la fermeture des stomates (limitant ainsi les pertes d'eau par transpiration) et en favorisant l'accroissement de la biomasse racinaire (Altaf *et al.*, 2020 ; Iqbal *et al.*, 2022). Toutefois, la variété Chhomrong Dhan est une variété sensible au stress hydrique (Raboin & Ramanantsoanirina, 2008). Elle a ainsi eu du mal à s'adapter au stress et n'a pas pu développer suffisamment sa biomasse racinaire. Or, ce sont généralement les plantes présentant un système racinaire profond et prolifique qui montrent une bonne adaptation en période de sécheresse (Kim *et al.*, 2020). C'est pourquoi, la croissance du riz a considérablement diminué en situation de stress hydrique.

D'autre part, les vers de terre n'ont présenté aucun effet significatif sur les paramètres de croissance du riz en situation TN/H75, mais ont par contre présenté des effets négatifs sur les biomasses aériennes, racinaires et totales du riz en situation TN/H50. Selon Tang *et al.* (2007), la cytokinine et l'auxine ont des effets antagonistes avec l'ABA. Les effets négatifs des vers de terre observés en situation de fort stress hydrique sont donc probablement liés à ces effets antagonistes. En effet, l'ABA est l'hormone responsable de la fermeture des stomates en période de sécheresse. En limitant cette action de l'ABA, l'auxine et la cytokinine produite par les vers de terre ont dû provoquer des pertes en eau considérables, conduisant ainsi à une réduction de la croissance du riz par rapport aux situations sans vers de terre. D'autre part, l'augmentation de la production d'ABA est principalement due à une diminution de la concentration en auxine causée par le stress hydrique (Jung *et al.*, 2015). Nous supposons donc qu'en fournissant aux plants de riz un surplus d'auxine, les vers de terre ont dû limiter la production d'ABA en période de sécheresse. Par ailleurs, les effets négatifs des vers de terre n'ont pas été observés avec un léger stress hydrique (TN/H75), probablement parce que ce stress n'a pas été suffisamment fort pour enclencher le mécanisme de production de l'ABA. En effet, ce mécanisme est enclenché seulement lorsque l'eau présente à l'intérieur de la plante descend en dessous d'un certain seuil (Waraich *et al.*, 2011). D'autre part, les effets négatifs des vers de terre n'ont également pas été observés avec le fumier, probablement parce que le mécanisme de production de l'ABA n'est optimal qu'avec une nutrition adéquate de la plante (Kumari *et al.*, 2022). Ce qui explique pourquoi la croissance du riz avec le fumier a été extrêmement faible en situation TN/H50 (seulement 0,18 g de biomasse aérienne).

### **3.3.3 Situation de stress thermique et hydrique combiné**

Les résultats ont montré qu'en situation de stress thermique et hydrique combiné, que ce soit en situation TS/H75 ou en situation TS/H50, le lombricompost est toujours resté meilleur que le fumier sur tous les paramètres de croissance du riz, sauf sur le ratio BA/BR qui n'a pas été influencé par le type de fertilisant organique. Ainsi, une nutrition adéquate a toujours un effet bénéfique sur la croissance du riz même en situation de stress combiné. Par ailleurs, les pertes

engendrées par les stress combinés ont généralement été plus importantes par rapport à celles engendrées par les stress individuels. En effet, les stress combinés ont beaucoup plus d'impact que les stress individuels sur le métabolisme du carbone photosynthétique, la respiration mitochondriale, ainsi que sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau ; et provoquent certainement une réduction plus importante de la croissance du riz (Perdomo *et al.*, 2017).

D'autre part, en situation TS/H75, les vers de terre ont eu un effet positif sur la biomasse aérienne, mais n'ont eu aucun effet sur les autres paramètres. En situation TS/H50, ils ont eu des effets négatifs sur la biomasse racinaire et la biomasse totale, mais n'ont par contre eu aucun effet sur la biomasse aérienne. Cela met en évidence la complexité de la réponse du riz face à un stress combiné. En effet, les connaissances actuelles concernant la réponse des plantes face à un stress combiné sont encore très limitées, surtout au niveau des changements d'hormones (Costa *et al.*, 2021). De plus, selon Rizhsky *et al.* (2004), comparé aux stress individuels, un stress thermique et hydrique combiné semble altérer le métabolisme de la plante d'une tout autre manière. D'ailleurs, les réponses métaboliques des plantes face à un stress combiné sont uniques et ne peuvent pas être directement extrapolées à partir des réponses des plantes en situation de stress individuel (Rizhsky *et al.*, 2004 ; Mittler, 2006). Toutefois, nous pouvons quand même avancer qu'en situation TS/H75, les phytohormones secrétées par les vers de terre ont certainement favorisé la croissance de la partie aérienne du riz. En effet, la cytokinine, l'auxine et la gibbérelline ont généralement pour action de favoriser la croissance de la partie aérienne des plantes (Little & MacDonald, 2003 ; Khadr *et al.*, 2020 ; Cho *et al.*, 2022). D'autre part, l'effet inhibiteur de la cytokinine sur le développement racinaire n'a pas été observé. Il semblerait donc que les vers de terre ont amélioré la croissance et la capacité d'adaptation du riz en situation TS/H75. Par contre, la tendance semble s'inverser en situation TS/H50 ; l'effet des phytohormones sur la croissance de la partie aérienne du riz n'a pas été observé, mais on retrouve l'effet inhibiteur de la cytokinine sur le développement racinaire. Ainsi, comme l'a aussi constaté Iqbal *et al.* (2022), des interactions complexes qui varient selon les situations semblent s'effectuer entre les différentes phytohormones en situation de stress combiné. Toutefois, nous pouvons dire que même en présentant une biomasse racinaire plus faible, le riz en présence de vers de terre a développé une même biomasse aérienne que le riz en absence de vers de terre. Ce qui sous-entend que l'activité racinaire a probablement été améliorée par la cytokinine, comme dans le cas de la situation TS/H100.

Finalement, notre deuxième hypothèse qui suggère que « le lombricompost et les vers de terre, seuls ou ensemble, améliorent la croissance et la capacité d'adaptation du riz en situation de stress thermique, en situation de stress hydrique, et en situation de stress thermique et hydrique combiné », est partiellement validée. Effectivement, le lombricompost a toujours eu un effet positif sur la croissance et la capacité d'adaptation du riz dans toutes les situations climatiques qui ont été testées, mais l'effet des vers de terre (ainsi que son effet synergique avec le lombricompost), n'a été réellement bénéfique pour la croissance et la capacité d'adaptation du riz qu'en situation de

stress thermique (TS/H100) et en situation de stress thermique combiné à un léger stress hydrique (TS/H75).

### **3.4 Limites de l'étude et perspectives**

Cette étude avait pour principal objectif de voir si le lombricompost et les vers de terre avaient un potentiel pour améliorer la résilience climatique du riz pluvial. Vu que nous avons vraiment été en phase exploratoire, nous nous sommes uniquement limités sur les mesures des principaux paramètres de croissance du riz, notamment les hauteurs, les nombres de talles et les biomasses végétales. Des mesures supplémentaires auraient effectivement pu nous aider à mieux comprendre les aspects et les mécanismes à travers lesquels le lombricompost et les vers de terre ont amélioré la croissance et la capacité d'adaptation du riz en situation de stress climatique. Ainsi, pour les recherches futures, il serait vraiment essentiel d'effectuer des mesures qualitatives et quantitatives sur les changements engendrés par les vers de terre au niveau des phytohormones de la plante en situation de stress, pour confirmer les hypothèses qui ont été émises dans cette étude. D'autre part, des mesures telles que les indices de végétations (PRI et NDVI) et les teneurs en éléments nutritifs (N et P) des plantes peuvent également aider à mieux comprendre les rôles que jouent le lombricompost et les vers de terre dans l'amélioration de l'adaptation aux stress climatiques. Ces mesures n'ont malheureusement pas pu être effectuées dans notre étude, à cause de la taille relativement petite de la plupart des plants de riz sous stress climatique. Afin de pouvoir prendre ces mesures, il serait donc préférable pour les recherches futures de prolonger la croissance du riz au-delà de 6 semaines.

En outre, l'effet des vers de terre sur l'amélioration de la croissance du riz en situation de stress climatique pourrait aussi être testé sur d'autres variétés. En effet, les changements d'hormones dus au stress peuvent beaucoup varier selon la variété de la plante (Li *et al.*, 2020). Ainsi, l'effet des vers de terre pourrait tout aussi bien varier selon la variété utilisée. Il serait également intéressant de tester l'effet des vers de terre dans des systèmes agricoles pouvant maintenir le sol à un niveau d'humidité élevé, à l'exemple des systèmes sous couvertures végétales, pour voir si l'effet négatif des vers de terre en situation de stress hydrique pourrait être atténué. D'autre part, il serait également intéressant de comparer l'effet du lombricompost avec d'autres fertilisants de même valeur nutritive. En effet, le lombricompost, étant issu de la décomposition de la matière organique par les vers de terre, contient également des phytohormones (Zhang *et al.*, 2015). Dans notre étude, nous n'avons pas pu mettre en exergue cet aspect du lombricompost car nous l'avons comparé avec un fertilisant ayant une valeur nutritive très faible. Mais en le comparant avec d'autres fertilisants de mêmes valeurs nutritives, la contribution des phytohormones présentes dans le lombricompost sur l'amélioration de la croissance et de l'adaptation du riz en situation de stress climatique pourrait potentiellement être mise en exergue. En outre, il serait aussi nécessaire de poursuivre l'étude jusqu'au stade de maturation du riz pour voir si les effets du lombricompost et des vers de terre en situation de stress climatique auraient un impact considérable sur le rendement du riz.

## CONCLUSION

Pour conclure, face à une tendance climatique prédisant une augmentation des températures et une réduction des précipitations, des pratiques de fertilisation innovantes prenant en compte le lombricompost et les vers de terre ont été proposées en vue d'améliorer la résilience climatique du riz pluvial. L'objectif de cette étude était de comprendre si des pratiques de fertilisation prenant en compte le lombricompost et les vers de terre pourraient améliorer la résilience climatique du riz pluvial. Bien que cette étude ait encore été en phase exploratoire, elle a quand même pu fournir des résultats intéressants et a apporté des éléments de réflexion sur le potentiel du lombricompost et des vers de terre à améliorer la résilience climatique du riz pluvial.

Les résultats ont montré que dans toutes les situations climatiques, le lombricompost a toujours présenté une meilleure performance que le fumier sur tous les paramètres de croissance du riz qui ont été mesurés. En effet, en assurant une bonne nutrition, le lombricompost permet non seulement au riz d'avoir une bonne croissance, mais favorise également l'activation des différents mécanismes d'adaptation nécessaire à l'atténuation des effets négatifs des stress climatiques. D'autre part, l'inoculation de vers de terre n'a pas montré d'effet significatif sur la croissance du riz en absence de stress climatique, mais a par contre montré un effet positif en situation de stress thermique et un effet négatif en situation de fort stress hydrique. Il semblerait que ces effets soient dus à la capacité des vers de terre à produire dans leurs turricules des substances similaires aux phytohormones.

Ainsi, cette étude a pu démontrer qu'un apport de lombricompost, associé à une inoculation de vers de terre, a un réel potentiel à améliorer la résilience climatique du riz pluvial, notamment en situation de stress thermique et en situation de stress thermique combiné à un léger stress hydrique. Par contre, des effets antagonistes entre l'acide abscissique (l'hormone responsable de la fermeture des stomates en période de sécheresse) et les phytohormones secrétées par les vers de terre sont susceptibles de nuire à la croissance du riz en situation de fort stress hydrique.

Toutefois, des études plus approfondies devront être effectuées afin de confirmer et mieux comprendre les mécanismes réels régissant à travers les effets des phytohormones secrétées par les vers de terre sur le comportement des plantes en situation de stress climatique. En effet, en raison de leur haut niveau de complexité, la plupart des mécanismes par lesquels les phytohormones (inter)agissent sur les plantes en situation de stress climatique sont encore mal compris et font encore actuellement l'objet de nombreuses études.

## BIBLIOGRAPHIE

1. ADAF, 2021. La quiescence et la diapause des vers de terre. Mai 2021. 3 p.
2. Altaf M.A., Shahid R., Ren M.X., Mora-Poblete F., Arnao M.B., Naz S., 2020. Phytomelatonin : an overview of the importance and mediating functions of melatonin against environmental stresses. *Physiol. Plant.* 172 : 820–846.
3. Altieri M.A., Nicholls C.I., Henao A., Lana M.A., 2015. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development.* 35:869–890.
4. Andrianaivonirina R.M., 2011. Caractérisation des matières organiques exogènes issues de l'élevage par la minéralisation potentielle pour une valorisation optimale. Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur en agronomie. Spécialisation : Agriculture. 32p.
5. AVSF, 2011. Perceptions et stratégies d'adaptation paysannes face aux changements climatiques à Madagascar : cas des régions Sud-ouest, Sud-est et des zones périurbaines des grandes agglomérations. Octobre 2011. 108 p.
6. AVSF, 2012. Caractérisation des stratégies d'adaptation au changement climatique en agriculture paysanne. Etude de capitalisation réalisée sur les terrains de coopération d'AVSF. Mai 2012. 50 p.
7. Ayres I, Guerra RAT., 1981. Água como fator limitante na distribuição das minhocas (Annelida, Oligochaeta) da Amazônia Central. *Acta Amazonica.* 11:77–86.
8. Bachelier., 1978. La faune des sols son écologie et son action. Initiation-Documentations techniques n°38. ORSTOM. Paris, 400 p.
9. Bento B. M. da C., França A. C., Oliveira R. G., Sardinha L.T., Leal F. D. S., 2020. Organic fertilization attenuates heat stress in lettuce cultivation. *Acta Agronómica.* 69 : 219–227.
10. Blanchart E., Albrecht A., Alegre J., Duboisset A., Gilot C., Pashanasi B., Lavelle P., Brussaard L., 1999. Effects of earthworms on soil structure and physical properties. *Earthworm management in tropical agroecosystems.* 5 : 149–171.
11. Blanchart E., Bernard L., Chotte J.-L., Cournac L., Chapuis L. L., Ratsiatosika O., Razafimbelo T., Trap J., 2021. Soil biodiversity in action : ecological intensification of soil processes for agrosystem services in the tropics. *Global Symposium on Soil Biodiversity*, FAO, Rome, Italy. 624-629.
12. Blanchart E., Ratsiatosika O., Raveloson H., Razafimbelo T. M., Razafindrakoto M.-A., Sester M., Becquer T., Bernard L., Trap J., 2020. Nitrogen supply reduces the earthworm-silicon control on rice blast disease in a Ferralsol. *Applied Soil Ecology.*



13. Blouin M., Barrere J., Meyer N., Lartigue S., Barot S., Mathieu J., 2019. Vermicompost significantly affects plant growth. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*. 39 : 34.
14. Bot A., Benites J., 2005. The Importance of Soil Organic Matter: Key to Drought-resistant Soil and Sustained Food Production. Food & Agriculture Org. 96 p.
15. Brouwer R., 1963. Some aspects of the equilibrium between overground and underground plant parts. 31-39.
16. Brown G.G., Pashanasi B., Villenave C., José C., Patron, Senapati B.K., Giri S., Barois I., Lavelle P., Blanchart E., Blakemore R.J., Spain A.V., Boyerer J., 1999. Effects of Earthworms on Plant Production in the Tropics. CABI Publishing. 4 : 87-148.
17. Brown G.G., Edwards C.A. & Brussaard L., 2004. How earthworms affect plant growth: burrowing into the mechanisms. In Edwards, C.A. (ed) *Earthworm ecology*. CRC Press, Boca Raton, USA, 13-49.
18. Caballero M., 1979. Influência dos fatores hídricos sobre a biomassa de *Pheretima hawayana* e *Pontoscolex corethrurus* (Annelida, Oligochaeta) *Zoo Intertrópica*. 1979 : 2:1-11.
19. Cao Y.-Y., Duan H., Yang L.-N., Wang Z.-Q., Zhou S.-C., Yang J.-C., 2008. Effect of Heat Stress During Meiosis on Grain Yield of Rice Cultivars Differing in Heat Tolerance and Its Physiological Mechanism. *Acta Agronomica Sinica*. 34 : 2134-2142.
20. Chaudhary D.R., Bhandari S.C., Shukla L.M., 2004. Role of vermicompost in sustainable agriculture - A review 12.
21. Cho L.-H., Yoon J., Tun W., Baek G., Peng X., Hong W.-J., Mori I.C., Hojo Y., Matsuura T., Kim S.-R., Kim S.-T., Kwon S.-W., Jung K.-H., Jeon J.-S., An G., 2022. Cytokinin increases vegetative growth period by suppressing florigen expression in rice and maize. *The Plant Journal: For Cell and Molecular Biology*. 110 : 1619-1635.
22. Chopart J.L., 2020. Systèmes racinaires des cultures annuelles tropicales : Effets du travail du sol sur les racines
23. Cohen I., Zandalinas S.I., Huck C., Fritschi F.B., Mittler R., 2021. Meta-analysis of drought and heat stress combination impact on crop yield and yield components. *Physiologia Plantarum*. 171:66-76.
24. Cohen-Shacham E., Walters G., Janzen C., Maginnis S., 2016. Nature-based Solutions to address global societal challenges. Gland, Switzerland : IUCN. 97 p.
25. Cossins A.R., Bowler K (1987). *Temperature Biology of Animals* (Chapman & Hall, London). 293p.
26. Costa M.V.J.D., Ramegowda Y., Ramegowda V., Karaba N.N., Sreeman S.M., Udayakumar M., 2021. Combined Drought and Heat Stress in Rice: Responses, Phenotyping and Strategies to Improve Tolerance. *Rice Science*. 28 : 233-242.

27. Oliveira R.A., Ramos M.M., de Aquino L.A., 2015. Chapter 8 - Irrigation Management, in: Santos, F., Borém, A., Caldas, C. (Eds.), Sugarcane. Academic Press, San Diego. 161–183.
28. DGM, 2019. Les tendances climatiques et les futurs changements climatiques à Madagascar. Juillet 2019. 20p.
29. Diacono M., Montemurro F., 2010. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 30 : 401–422
30. Doran J.W., Smith M.S., 1987. Organic Matter Management and Utilization Of Soil and Fertilizer Nutrients, in: *Soil Fertility and Organic Matter as Critical Components of Production Systems*. John Wiley & Sons, Ltd. 53–72.
31. Edwards C.A., 2004. *Earthworm Ecology*. CRC Press, 458 p.
32. Escandón M., Cañal M. J., Pascual J., Pinto G., Correia B., Amaral J., 2016. Integrated physiological and hormonal profile of heat-induced thermotolerance in *Pinus radiata*. *Tree Physiol*. 36 63–77.
33. Fahad S., Bajwa A.A., Nazir U., Anjum S.A., Farooq A., Zohaib A., Sadia S., Nasim W., Adkins S., Saud S., Ihsan M.Z., Alharby H., Wu C., Wang D., Huang J., 2017. Crop Production under Drought and Heat Stress: Plant Responses and Management Options. *Frontiers in Plant Science*. 8 p.
34. Fahad S., Hussain S., Saud S., Hassan S., Tanveer M., Ihsan M. Z., Shah A. N., Ullah A., Nasrullah, Khan F., Ullah S., Alharby H., Nasim W., Wu C., Huang J., 2016. A combined application of biochar and phosphorus alleviates heat-induced adversities on physiological, agronomical and quality attributes of rice. *Plant Physiol Biochem*. 103 : 191-198.
35. FAO, 2018. The 10 elements of agroecology guiding the transition to sustainable food and agricultural systems. Rome, Italy. 12 p.
36. FAO, 2018. The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050. FAO, Rome, Italy, 228 p.
37. FOFIFA, 2009. Catalogue variétal : variétés de riz pluvial pour les Hautes Terres de 1300 à 1800 m. 11p.
38. Fragoso C., 1985. Ecología general de las lombrices terrestres (Oligochaeta: Annelida) de la región boca del Chajul, Selva lacandona (Chiapas, Mexico). Thesis, Universidad Autonoma de Mexico, Mexico. 133 p.
39. Giri A., Heckathorn S., Mishra S., Krause C., 2017. Heat Stress Decreases Levels of Nutrient-Uptake and -Assimilation Proteins in Tomato Roots. *Plants*. 6:6.
40. GIZ, 2021. Profil de risque climatique : Madagascar. Sur mandat du Ministère fédéral de la Coopération économique et du Développement. 11 p.
41. Grant W.C., 1955. Studies on water relationships in earthworms. *Ecology*. 36 : 400–407.
42. GSDM, 2020. Journal de l'agroécologie. Edition trimestrielle N°9. 44 p.

43. Hall R., 1993. A framework linking intangible resources and capabilities to sustainable competitive advantage. *Strategic Management Journal*. 14:607–618.
44. Harvey C.A., Rakotobe Z.L., Rao N.S., Dave R., Razafimahatratra H., Rabarijohn R.H., Rajaofara H., MacKinnon J.L., 2014. Extreme vulnerability of smallholder farmers to agricultural risks and climate change in Madagascar. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 369:20130089.
45. Heckathorn S.A., Poeller G.J., Coleman J.S., Hallberg R.L., 1996. Nitrogen availability alters patterns of accumulation of heat stress-induced proteins in plants. *Oecologia* 105 : 413–418.
46. Hossain M.Z., Sikder S., Husna A., Sultana S., Akhter S., Alim A., Joardar J.C., 2020. Influence of Water Stress on Morphology, Physiology and Yield Contributing Characteristics of Rice. *SAARC Journal of Agriculture*. 18 : 61–71.
47. Huang B., Rachmilevitch S., Xu J., 2012. Root carbon and protein metabolism associated with heat tolerance. *Journal of Experimental Botany*. 63:3455–3465.
48. Ingestad T., I. Ågren G., 1992. Theories and methods on plant nutrition and growth. *Physiologia Plantarum*. 84 : 177–184.
49. IPCC, 2021. Technical Summary. In *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1 : 33–144.
50. Iqbal S., Wang X., Mubeen I., Kamran M., Kanwal I., Díaz G.A., Abbas A., Parveen A., Atiq M.N., Alshaya H., Zin El-Abedin T.K., Fahad S., 2022. Phytohormones Trigger Drought Tolerance in Crop Plants: Outlook and Future Perspectives. *Frontiers in Plant Science*. 12 p.
51. Johnson M. J., Umiker K., Guy S., 2007. Earthworm dynamics and soil physical properties in the first three years of no-till management. *Soil Tillage Res*. 94 : 338–345.
52. Jung H., Lee D.-K., Do Choi Y., Kim, J.-K., 2015. OsIAA6, a member of the rice Aux/IAA gene family, is involved in drought tolerance and tiller outgrowth. *Plant Sci*. 236 : 304–312.
53. Kennedy C., Cuddihy J., Engel-Yan J., 2007. The changing metabolism of cities. *J. Ind. Ecol*. 11 : 43–59.
54. Khadr A., Wang G.-L., Wang Y.-H., Zhang R.-R., Wang X.-R., Xu Z.-S., Tian Y.-S., Xiong A.-S., 2020. Effects of auxin (indole-3-butyric acid) on growth characteristics, lignification, and expression profiles of genes involved in lignin biosynthesis in carrot taproot. *PeerJ*. 8.
55. Kim Y., Chung Y.S., Lee E., Tripathi P., Heo S., Kim K.H., 2020. Root response to drought stress in rice (*Oryza sativa* L.) *Int J Mol Sci*. 1513 p.
56. Köhl K., 2015. Growing rice in controlled environments: Rice in controlled environments. *Annals of Applied Biology*. 167.

57. Kroevoets I.T., Venema J.H., Elzenga J.T., Testerink C., 2016. Roots withstanding their environment : Exploiting root system architecture responses to abiotic stress to improve crop tolerance. *Front. Plant Sci.* 31 : 1335.
58. Kumari V.V., Banerjee P., Verma V.C., Sukumaran S., Chandran M.A.S., Gopinath K.A., Venkatesh G., Yadav S.K., Singh V.K., Awasthi N.K., 2022. Plant Nutrition: An Effective Way to Alleviate Abiotic Stress in Agricultural Crops. *International Journal of Molecular Sciences.* 23:8519.
59. Lavelle P., 1971. Etude préliminaire de la nutrition d'un ver de terre africain *Millsonia anomala* (Acanthodrilidae, Oligochètes). *Annales de Zoologie et Ecologie Animale, Hors-série*, 133-45
60. Lavelle P., Barois I., Cruz I., Fragoso C., Hernandez A., Pineda A., Rangel P., 1987. Adaptive strategies of *Pontoscolex corethrurus* (Glossoscolecidae, Oligochaeta), a peregrine geophagous earthworm of the humid tropics. *Biology and Fertility of Soils.* 5 : 188–194.
61. Lavelle P., Barros E., Blanchart E., Brown G., Desjardins T., Mariani L., Rossi J.-P., 2001. SOM management in the tropics: Why feeding the soil macrofauna? *Nutrient Cycling in Agroecosystems.* 61 : 53–61.
62. Lavelle P., Spain A.V., 2001. *Soil Ecology.* Kluwer Sci. Pub, Amsterdam.
63. Lavelle, P., 1981. Stratégies de reproduction chez les Vers de terre. *Acta Oecologica. Oecologia Generalis* 117–133.
64. Lee K.E., 1985. *Earthworms, their Ecology and Relationships with Soils and Land Use,* Academic Press, Australia. 411 p.
65. Li G., Zhang C., Zhang G., Fu W., Feng B., Chen T., Peng S., Tao L., Fu G., 2020. Absciscic Acid Negatively Modulates Heat Tolerance in Rolled Leaf Rice by Increasing Leaf Temperature and Regulating Energy Homeostasis. *Rice.* 13 : 18.
66. Lipiec J., Doussan C., Nosalewicz A., Kondracka K., 2013. Effect of drought and heat stresses on plant growth and yield: a review. *International Agrophysics.* 27 : 463–477.
67. Little C.H.A., MacDonald J.E., 2003. Effects of exogenous gibberellin and auxin on shoot elongation and vegetative bud development in seedlings of *Pinus sylvestris* and *Picea glauca*. *Tree Physiology.* 23 : 73–83.
68. Liu K., Deng J., Lu J., Wang X., Lu B., Tian X., Zhang Y., 2019. High nitrogen levels alleviate yield loss of super hybrid rice caused by high temperatures during the flowering stage *Front. Plant Sci.* 357 p.
69. MAEP, 2006. *Stratégie nationale pour le développement de l'utilisation de l'engrais.* Mai 2006. 119 p.
70. Mahanayak B., Chakraborty S., Panigrahi A., 2017. Use of Earthworms for Sustainable Agriculture. *Indian Journal of Biology.* 4:151–157.

71. Mandal S., Ghorai M., Anand U., Samanta D., Kant N., Mishra T., Rahman Md.H., Jha N.K., Jha S.K., Lal M.K., Tiwari R.K., Kumar M., Radha, Prasanth D.A., Mane A.B., Gopalakrishnan A.V., Biswas P., Proćków J., Dey A., 2022. Cytokinin and abiotic stress tolerance -What has been accomplished and the way forward? *Frontiers in Genetics*. 13 p.
72. Manyuchi M.M., Kadzungura L., Phiri A., Muredzi P., 2013. Effect of Vermicompost, Vermiwash and Application Time on Zea Mays Growth. *International Journal of Scientific Engineering and Technology* 2 : 638-641.
73. McLatchey G.P., Reddy K.R., 1998. Regulation of Organic Matter Decomposition and Nutrient Release in a Wetland Soil. *Journal of Environmental Quality*. 27:1268–1274.
74. Mittler R., 2006. Abiotic stress, the field environment and stress combination. *Trends in Plant Science* 11, 15–19.
75. Mittler R., Finka A., and Goloubinoff P., 2011. How do plants feel the heat ? *Trends biochem. Sci.* 37 : 118–125.
76. Mukamuhirwa A., Persson Hovmalm H., Bolinsson H., Ortiz R., Nyamangyoku O., Johansson E., 2019. Concurrent Drought and Temperature Stress in Rice-A Possible Result of the Predicted Climate Change: Effects on Yield Attributes, Eating Characteristics, and Health Promoting Compounds. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 16:1043.
77. Neyton S., Abbadly D., Sarthou J-P., 2022. Agroecosystem : Definition. *Dictionnaire d'agroécologie*. <https://dicoagroecologie.fr/en/dictionnaire/agroecosystem/>
78. Oliveira L., Coroller M., Perrin A., Martin G. G., 2019. Résilience des systèmes agricoles : Définition. INRAE. *Dictionnaire d'Agroécologie*. <https://doi.org/10.17180/pzfp-0p53>
79. PAM, 2018. L'état de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde : renforcer la résilience face aux changements climatiques pour la sécurité alimentaire et la nutrition. 198 p.
80. Parveen A., Ahmar S., Kamran M., Malik Z., Ali A., Riaz M., 2021. Absciscic acid signaling reduced transpiration flow, regulated Na<sup>+</sup> ion homeostasis and antioxidant enzyme activities to induce salinity tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Env. Technol. Innov.* 24 : 101808.
81. Penot E., Durand C., Nave S., Domas R., Andriamalala H., Hyac P., Dupin B., Rabenandro T. H., Rasolomanjaka J., 2009. Place et rôle du riz pluvial dans les systèmes de production du lac Alaotra. 60 p.
82. Perdomo J.A., Capó-Bauçà S., Carmo-Silva E., Galmés J., 2017. Rubisco and Rubisco Activase Play an Important Role in the Biochemical Limitations of Photosynthesis in Rice, Wheat, and Maize under High Temperature and Water Deficit. *Frontiers in Plant Science*. 8:490.

83. Prasad P.V.V., Staggenborg S.A., Ristic Z., 2008. Impacts of Drought and/or Heat Stress on Physiological, Developmental, Growth, and Yield Processes of Crop Plants, in: Response of Crops to Limited Water. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 301–355.
84. Rabeharisoa L. 2004. Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des Hautes Terres de Madagascar. Thèse de doctorat d'Etat ès Sciences naturelles. 199p.
85. Raboin L. M. & Ramanantsoanirina A., 2008. Amélioration génétique du riz pluvial : Hauts Plateaux, Moyen Ouest, Sud Est (GSDM). Campagnes 2006-2007 et 2007-2008. URP SCRiD. 103 p.
86. Raboin L.-M., Ramanantsoanirina A., Dzido J.-L., Frouin J., Radanielina T., Tharreau D., Dusserre J., Ahmadi N., 2013. Création variétale pour la riziculture pluviale d'altitude à Madagascar : bilan de 25 années de sélection. Cahiers Agricultures.
87. Raharimala S., Audouin S., 2021. SECuRE, compte rendu synthétique des ateliers de restitution des résultats issus de l'évaluation paysanne croisée avec les indicateurs scientifiques. Rapport interne.
88. Ralaizafisolariovy N., 2012. Effets de la fertilisation organique sur la biodisponibilité de phosphore : cas des sols ferrallitiques des Hautes Terres de Madagascar (Lazaina). Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention de diplôme d'ingénieur agronome. 74 p.
89. Raminoarison M., Razafimbelo T., Rakotoson T., Becquer T., Blanchart E., Trap J., 2019. Multiple-nutrient limitation of upland rainfed rice in Ferralsols : a greenhouse nutrient-omission trial. Journal of Plant Nutrition. 43 : 270-284.
90. Ratsiatosika O., 2014. Effets de l'introduction de vers de terre sur la croissance et le rendement du riz et du, mais associé à la dolique sur les hautes terres de madagascar (cas de lazaina). Mémoire de fin d'étude pour obtenir le diplôme d'ingénieur Agronome, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo-Madagascar. 46 p.
91. Ratsiatosika O., Blanchart E., Razafimbelo T., Razafindrakoto M., vom Brocke K., Cao-Hamadou T.-V., Rakotomalala Andriamarosata J.-M., Ramanantsoanirina A., Trap J., 2021. Does rice breeding affect the ability of plants to interact with earthworms in nutrient-depleted Ferralsols? Applied Soil Ecology. 163:103958.
92. Ratsiatosika O., Razafindrakoto M., Razafimbelo T., Rabenarivo M., Becquer T., Bernard L., Trap J., Blanchart E., 2021. Earthworm Inoculation Improves Upland Rice Crop Yield and Other Agrosystem Services in Madagascar. Agriculture. 11 : 60.
93. Ravonjirarison N., Penot E., Alain A., Razafimbelo T., 2018. Savoirs locaux et stratégies paysannes autour de la fertilité des sols au lac Alaotra, Madagascar. 41 p.
94. Razafindrakoto M., 2012. Etude des Oligochètes de Madagascar : Taxonomies, écologies et distributions. Thèse de Doctorat, Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, spécialité : Biologie Animale, 151p.

95. Rizhsky L., Liang H., Shuman J., Shulaev V., Davletova S., Mittler R., 2004. When defense pathways collide. The response of Arabidopsis to a combination of drought and heat stress. *Plant Physiology*. 134 : 1683–1696.
96. Sailaja B., Anjum N., Vishnu Prasanth V., Sarla N., Subrahmanyam D., Voleti S.R., Viraktamath B.C., Mangrauthia S.K., 2014. Comparative Study of Susceptible and Tolerant Genotype Reveals Efficient Recovery and Root System Contributes to Heat Stress Tolerance in Rice. *Plant Molecular Biology Reporter*. 32 : 1228–1240.
97. Sairam R. K., Srivastava G. C., Saxena D. C., 2000. Increased antioxidant activity under elevated temperatures : a mechanism of heat stress tolerance in wheat genotypes. *Biol Plant*. 43 : 245–251.
98. Sarvestani Z.T., Pirdashti H., Sanavy S.A.M.M., Balouchi H., 2008. Study of water stress effects in different growth stages on yield and yield components of different rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *Pakistan journal of biological sciences: PJBS*. 11:1303–1309.
99. Schaller G.E., Street I.H., Kieber J.J., 2014. Cytokinin and the cell cycle. *Current Opinion in Plant Biology*. SI: Cell signalling and gene regulation. 21 : 7–15.
100. Scheu, S., 2003. Effects of earthworms on plant growth: patterns and perspectives. *Pedobiologia*, 47: 846-856.
101. SECURE, 2020. Gestion comparée de la fertilité au niveau des exploitations agricoles familiales du Moyen-Ouest de la région Vakinankaratra et des Hautes-Terres de la région Itasy à Madagascar. Avril 2020. 23 p.
102. Shrestha S., Asch F., Brueck H., Giese M., Dusserre J., Ramanantsoanirina A., 2013. Phenological responses of upland rice grown along an altitudinal gradient. *Environmental and Experimental Botany*. 89 : 1–10.
103. Sun T., Hasegawa T., Liu B., Tang L., Liu L., Cao W., Zhu Y., 2021. Current rice models underestimate yield losses from short-term heat stresses. *Global Change Biology*. 27 : 402–416.
104. Tang R.S., Zheng J.C., Jin Z.Q., Zhang D.D., Huang Y.H., Chen L.G., 2007. Possible correlation between high temperature-induced floret sterility and endogenous levels of IAA, GAs and ABA in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Growth Regul*. 54 : 37-43.
105. Trap J., Blanchart E., Ratsiatosika O., Razafindrakoto M., Becquer T., Andriamananjara A., Morel C., 2021. Effects of the earthworm *Pontoscolex corethrurus* on rice P nutrition and plant-available soil P in a tropical Ferralsol. *Applied Soil Ecology*. 160 : 103867.
106. Van Bemmelen D. J. M., 1890. Über die Bestimmung des Wassers, des Humus, des Schwefels, der in den colloïdalen Silikaten gebundenen Kieselsäure, des Mangans u. s. w. im Ackerboden. (In German.) *Die Landwirthschaftlichen Versuchs-Stationen*. 37 : 279– 290.

107. Van Groenigen, J. W., Lubbers I. M., Vos H. M. J., Brown G. G., De Deyn G. B., Van Groenigen K. J., 2014. Earthworms increase plant production : a meta-analysis. *Nature Scientific Reports*. 4 : 6365.
108. Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., and Foolad, M. R., 2007. Heat tolerance in plants: an overview. *Environ. Exp. Bot.* 61 : 199–223.
109. Wang Y., Wang L., Zhou J., Hu S., Chen H., Xiang J., Zhang Yikai, Zeng Y., Shi Q., Zhu D., Zhang Yuping, 2019. Research Progress on Heat Stress of Rice at Flowering Stage. *Rice Science*. 26 : 1–10.
110. Waraich E.A., Ahmad R., Ashraf M.Y., Saifullah, Ahmad M., 2011. Improving agricultural water use efficiency by nutrient management in crop plants. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*. 61 : 291–304.
111. Waraich E.A., Ahmad R., Halim A., Aziz T., 2012. Alleviation of temperature stress by nutrient management in crop plants: a review. *Journal of soil science and plant nutrition*. 12 : 221–244.
112. Weiskopf S., Cushing J., Morelli T.L., Myers B., 2021. Climate change risks and adaptation options for Madagascar. *Ecology and Society*. 26 p.
113. Wezel A., Soboksa G., McClelland S., Delespesse F., Boissau A., 2015. The blurred boundaries of ecological, sustainable, and agroecological intensification: a review. *Agronomy for Sustainable Development*. 35 : 1283–1295.
114. Wu C., Cui K., Wang W., Li Q., Fahad S., Hu Q., Huang J., Nie L., Peng S., 2016. Heat-induced phytohormone changes are associated with disrupted early reproductive development and reduced yield in rice. *Science Rep.* 6 : 34978.
115. Xiong Q., Tang G., Zhong L., He H., Chen X., 2018. Response to Nitrogen Deficiency and Compensation on Physiological Characteristics, Yield Formation, and Nitrogen Utilization of Rice. *Frontiers in Plant Science*. 9 p.
116. Xu Y., Chu C., Yao S., 2021. The impact of high-temperature stress on rice: Challenges and solutions. *The Crop Journal*. 9 : 963–976.
117. Xu Y., Tian J., Gianfagna T., and Huang B., 2009. Effects of SAG12-ipt expression on cytokinin production, growth and senescence of creeping bentgrass (*Agrostis stolonifera* L.) under heat stress. *Plant Growth Regul.* 57, 281–291.
118. Yoshida S., 1973. Effects of temperature on growth of the rice plant (*Oryza sativa* L.) in a controlled environment. *Soil Science and Plant Nutrition*. 19 : 299–310.
119. Zhang H., Tan S.N., Teo C.H., Yew Y.R., Ge L., Chen X., Yong J.W.H., 2015. Analysis of phytohormones in vermicompost using a novel combinative sample preparation strategy of ultrasound-assisted extraction and solid-phase extraction coupled with liquid chromatography–tandem mass spectrometry. *Talanta*. 139 : 189–197.



## **LISTES DES ANNEXES**

Annexe 1 : Caractéristiques physico-chimiques du sol utilisé dans l'expérimentation (0-15 cm) .....	xi
Annexe 2 : Caractères morphologiques et agronomiques de la variété Chhomrong Dhan.....	xii
Annexe 3 : Calcul de l'humidité du sol (en % de la Cc) à partir du poids des pots.....	xiii
Annexe 4 : Résultats des tests ANOVA.....	xiii
Annexe 5 : Tableau récapitulatif de l'effet du lombricompost et des vers pour chaque situation climatique .....	xvi

**Annexe 1 : Caractéristiques physico-chimiques du sol utilisé dans l'expérimentation (0-15 cm)**

PARAMETRES	UNITES	VALEURS
<b>Eléments</b>		
C total	g kg <sup>-1</sup>	29,2
N total	g kg <sup>-1</sup>	2,07
P total	g kg <sup>-1</sup>	1,43
S total	g kg <sup>-1</sup>	0,3
pH <sub>eau</sub>		4,70
pH <sub>KCl</sub>		4,09
CEC	cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup>	1,73
Ca échangeable	cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup>	0,42
K échangeable	cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup>	0,06
Mg échangeable	cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup>	0,15
Al échangeable	cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup>	0,59
P Olsen	mg kg <sup>-1</sup>	3,76
P résine	mg kg <sup>-1</sup>	0,47
Pi_NaOH <sup>a</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	53,6
P total_NaOH <sup>a</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	196,90
Po_NaOH <sup>a</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	143,33
<b>Distribution granulométrique</b>		
Argile + limon fin	%	71,3
Limon grossier	%	15,3
Sable fin	%	8,6
Sable grossier	%	4,6
<b>Oxydes</b>		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> total	%	31,43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> total	%	28,13
SiO <sub>2</sub> total	%	10
<b>Contenus minéraux</b>		
Kaolinite	mg kg <sup>-1</sup>	112,48
Gibbsite	mg kg <sup>-1</sup>	201,26

<sup>a</sup> Formes de P extractibles par NaOH. Pi signifie P inorganique tandis que Po signifie P organique

Source : Raminoarison, 2021

## Annexe 2 : Caractères morphologiques et agronomiques de la variété Chhomrong Dhan.

Chhomrong Dhan								
Nom commun	Nom botanique	Dénomination	Nature génétique	Origine (code)	Obtenteur	Référence (collection FOFIFA)	Année d'introduction (collection)	Mainteneur
Riz	<i>Oryza Sativa</i>	<b>Chhomrong Dhan</b>	Lignée introduite	Népal	FOFIFA / CIRAD	4368	1995	FOFIFA

Grains de paddy



Grains décortiqués (riz cargo)



Grains usinés



### CARACTERES MORPHOLOGIQUES

<b>PANICULE</b>	
• Longueur	: moyenne
• Type	: ouvert
<b>FEUILLE</b>	
• Longueur et largeur des feuilles	: 24 cm * 1,3 cm
<b>GRAIN</b>	
• Couleur des glumelles	: bicolore (jaune/rouge)
• Couleur de l'apex	: violet foncé
• Couleur du péricarpe	: rouge
• Longueur du grain vêtu	: 7,4 mm
• Largeur du grain vêtu	: 3,1 mm
• Poids de 1000 grains (paddy)	: 26 g
• Type de grain	: demi-rond
• Translucidité	: bonne

### CARACTERES AGRONOMIQUES

• Aptitude culturale	: pluviale
• Aire de culture	: 1000 -1800 m
• Hauteur du plant	: intermédiaire
• Cycle à 50% de floraison	: 130 jours
• Cycle (à maturité)	: 165 jours
• Tallage	: fort
• Rendement moyen	: 5,3 t/ha
• Résistance au froid (% épillets fertiles)	: 85 %
• Verse	: sensible
• Egrenage	: moyen

### Comportement vis-à-vis des bioagresseurs

• Résistance à la pyriculariose du cou	: résistant
--	-------------

### Autres traits spécifiques

- Aspect sanitaire du grain

### Annexe 3 : Calcul de l'humidité du sol (en % de la Cc) à partir du poids des pots

Une fois séché à l'air, l'humidité du sol a été testé à l'humidimètre. Sa valeur était de 11,39%. Vu qu'il a été fixé de mettre 1500 g de sol sec dans chaque pot, le poids du sol séché à l'air mis dans chaque pot était de 1692,8 g (incluant 1500 g de sol sec et 192,8 g d'eau représentant les 11,39% d'humidité). Pour mettre ce sol à 100% de la Cc, au lieu d'apporter 750 g d'eau (puisque la Cc au champ de notre sol était de 50%), il ne fallait plus apporter que 557,2 g d'eau puisque le sol était déjà constitué de 192,8 g d'eau. Le tout a été pesé tout en incluant le poids du pot en plastique et le poids d'un pot dans lequel le sol a été humecté à 100% de la Cc a ainsi été obtenu. Pour déterminer ensuite l'humidité du sol par rapport à la Cc à une date quelconque, la formule suivante a été utilisée :

$$H_d \text{ (en \% de la Cc)} = [750g - (P_{100\%} - P_d)] * 100 / 750g$$

- $H_d$  : humidité du sol par rapport à la Cc à une date d
- $P_{100\%}$  : Poids du pot dont le sol a été humecté à 100% de la Cc (incluant le poids du pot en plastique, 1500g de sol sec et 750g d'eau)
- $P_d$  : Poids du pot à une date d (incluant le poids du pot en plastique, 1500g de sol sec et le poids de l'eau restant dans le sol)

### Annexe 4 : Résultats des tests ANOVA

#### Annexe 4-1 : p-value de l'ANOVA à un facteur sur la capacité au champ du sol

FACTEUR	CAPACITÉ AU CHAMP DU SOL
Type de fertilisant organique (FO)	0,187

‘\*\*’ effet significatif, ‘\*\*\*’ effet fortement significatif, ‘\*\*\*\*’ effet très fortement significatif.

#### Annexe 4-2 : p-value de l'ANOVA à trois facteurs sur le taux de survie des vers et le taux de vers actifs

FACTEURS	TAUX DE SURVIE DES VERS	TAUX DE VERS ACTIFS
Type de FO	0,658	0,754
Température	0,004**	<0,001***
Régime Hydrique	0,266	<0,001***
Type de FO : Température	0,658	0,754
Type de FO : Régime hydrique	0,82	0,674
Température : Régime hydrique	0,015*	0,002 **
Type de FO : Température : Régime hydrique	0,820	0,674

‘\*\*’ effet significatif, ‘\*\*\*’ effet fortement significatif, ‘\*\*\*\*’ effet très fortement significatif.

**Annexe 4-3 : p-value de l'ANOVA à deux facteurs des hauteurs**

FACTEURS	DATE (JAG)	SITUATIONS CLIMATIQUES					
		TN/H100	TS/H100	TN/H75	TS/H75	TN/H50	TS/H50
Type de FO	14	0,005**	<0,001***	0,148	0,008**	0,015*	0,002**
	28	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***
	42	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***
Vers	14	0,632	0,452	0,674	0,393	0,407	0,598
	28	0,519	<0,001***	0,14	0,18	0,148	0,69
	42	0,6911	0,004**	0,182	0,149	0,591	0,925
Interaction	14	0,175	0,142	0,674	0,887	0,955	0,98
	28	0,828	<0,001***	0,39	0,23	0,722	0,312
	42	0,99	<0,001***	0,135	0,35	0,324	0,46

‘\*\*’ effet significatif, ‘\*\*\*’ effet fortement significatif, ‘\*\*\*\*’ effet très fortement significatif.

**Annexe 4-4 : p-value de l'ANOVA à deux facteurs sur les nombres de talles**

FACTEURS	DATE (JAG)	SITUATIONS CLIMATIQUES					
		TN/H100	TS/H100	TN/H75	TS/H75	TN/H50	TS/H50
Type de FO	14	0,346	0,346	0,346	0,346	0,346	0,346
	28	<0,001***	0,008**	0,115	0,066	0,346	0,346
	42	<0,001***	<0,001***	0,006**	<0,001***	<0,001***	<0,001***
Vers	14	0,346	0,346	0,346	0,346	0,346	0,346
	28	0,217	0,066	0,319	0,499	0,346	0,346
	42	1	0,438	0,659	0,58	0,05	0,346
Interaction	14	0,346	0,346	0,346	0,346	0,346	0,346
	28	0,217	0,066	0,319	0,499	0,346	0,346
	42	0,397	1	0,659	0,122	0,282	0,346

‘\*\*’ effet significatif, ‘\*\*\*’ effet fortement significatif, ‘\*\*\*\*’ effet très fortement significatif.

**Annexe 4-5 : p-value de l'ANOVA à deux facteurs sur les biomasses aériennes**

FACTEURS	SITUATIONS CLIMATIQUES					
	TN/H100	TS/H100	TN/H75	TS/H75	TN/H50	TS/H50
Type de FO	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***	<0,001***
Vers	0,461	0,002**	0,508	0,097	0,005**	0,89
Interaction	0,064	<0,001***	0,777	0,011*	0,013*	0,573

‘\*\*’ effet significatif, ‘\*\*\*’ effet fortement significatif, ‘\*\*\*\*’ effet très fortement significatif.

**Annexe 4-6 : p-value de l'ANOVA à deux facteurs sur les biomasses racinaires**

FACTEURS	SITUATIONS CLIMATIQUES					
	TN/H100	TS/H100	TN/H75	TS/H75	TN/H50	TS/H50
Type de FO	0,015*	<0,001***	0,001**	<0,001***	<0,001***	<0,001***
Vers	0,490	0,009**	0,782	0,18	0,419	0,002**
Interaction	0,490	0,571	0,727	0,967	0,038*	0,004**

‘\*\*’ effet significatif, ‘\*\*\*’ effet fortement significatif, ‘\*\*\*\*’ effet très fortement significatif

**Annexe 4-7 : p-value de l'ANOVA à deux facteurs sur les biomasses totales**

FACTEURS	SITUATIONS CLIMATIQUES					
	TN/H100	TS/H100	TN/H75	TS/H75	TN/H50	TS/H50
Type de FO	<0,001***	<0,001***	0,001**	<0,001***	<0,001***	<0,001***
Vers	0,755	0,197	0,657	0,104	0,033*	0,044*
Interaction	0,086	0,049*	0,841	0,053	0,017*	0,047*

‘\*\*’ effet significatif, ‘\*\*\*’ effet fortement significatif, ‘\*\*\*\*’ effet très fortement significatif.

**Annexe 4-8 : p-value de l'ANOVA à deux facteurs sur les ratios BA/BR**

FACTEURS	SITUATIONS CLIMATIQUES					
	T0/H100	T1/H100	T0/H75	T0/H50	T1/H75	T1/H50
Type de FO	0,016*	0,101	0,336	0,925	0,294	0,085
Vers	0,54	0,002*	0,837	0,925	0,14	0,015*
Interaction	0,707	0,812	0,575	0,05	0,552	0,471

‘\*\*’ effet significatif, ‘\*\*\*’ effet fortement significatif, ‘\*\*\*\*’ effet très fortement significatif

**Annexe 5 :** Tableau récapitulatif de l'effet du lombricompost et des vers pour chaque situation climatique

PARAMETRES MESURES	TN/H100	TS/H100	TN/H75	TS/H75	TN/H50	TS/H50
Hauteur	L V	L V <sub>(L)</sub>	L V	L V	L V	L V
Nombre de talles	L V	L V	L V	L V	L V	L V
Biomasse aérienne	L V	L V <sub>(L)</sub>	L V	L V <sub>(L)</sub>	L V <sub>(L)</sub>	L V
Biomasse racinaire	L V	L V	L V	L V	L V <sub>(L)</sub>	L V <sub>(L)</sub>
Biomasse totale	L V	L V <sub>(F)</sub>	L V	L V	L V <sub>(L)</sub>	L V <sub>(L)</sub>
Ratio BA/BR	L V	L V	L V	L V	L V	L V

Les lettres L et V correspondent respectivement à l'apport de lombricompost et à l'inoculation de vers de terre. Lorsque la lettre est colorée en vert, l'effet a été significatif et positif. Lorsqu'elle est colorée en rouge, l'effet a été significatif et négatif. Lorsqu'elle est colorée en gris, il n'y pas eu d'effet significatif. Les petites lettres entre parenthèse indique qu'il y a eu un effet significatif de l'interaction et que l'effet des vers de terre n'a été significatif qu'avec le type de fertilisant mis entre parenthèse (L pour lombricompost et F pour fumier).

# TABLES DES MATIERES

LISTES DES ILLUSTRATIONS.....	a
LISTES DES ABRÉVIATIONS .....	b
GLOSSAIRE.....	d
RÉSUMÉ .....	e
ABSTRACT.....	f
FINTINA.....	g
INTRODUCTION .....	1
1 MATÉRIELS ET MÉTHODES.....	4
1.1 Matériels utilisés .....	4
1.1.1 Type de sol.....	4
1.1.2 Variété de riz.....	5
1.1.3 Types de fertilisants organiques.....	5
1.1.4 Espèce de vers de terre.....	5
1.2 Dispositif expérimental .....	6
1.2.1 Facteurs étudiés.....	6
1.2.1.1 Type de fertilisant organique .....	6
1.2.1.2 Inoculation des vers de terre .....	7
1.2.1.3 Situations climatiques .....	7
1.2.2 Mise en pot.....	9
1.2.3 Configurations dans la salle .....	9
1.2.4 Schéma récapitulatif du déroulé de l'expérimentation .....	12
1.3 Mesures effectuées .....	13
1.3.1 Avant l'expérimentation .....	13
1.3.2 Au cours de l'expérimentation.....	13
1.3.3 À la fin de l'expérimentation .....	14
1.4 Traitements statistiques.....	14
2 RÉSULTATS.....	16
2.1 Capacité au champ du sol.....	16
2.2 Durées des stress hydriques .....	16
2.3 Survie et activité des vers de terre à la fin de l'expérimentation .....	17
2.4 Analyse de l'effet du lombricompost et des vers pour chaque situation climatique.....	19
2.4.1 Hauteurs .....	19
2.4.2 Nombres de talles.....	21
2.4.3 Biomasses végétales.....	24
2.4.3.1 Biomasses aériennes .....	24
2.4.3.2 Biomasses racinaires .....	26



2.4.3.3	Biomasses totales .....	28
2.4.3.4	Ratios BA/BR .....	30
3	DISCUSSION ET PERSPECTIVES .....	33
3.1	Persistance des vers de terre à la fin de l'expérimentation .....	33
3.2	Effets du lombricompost et des vers de terre sur la croissance du riz en absence de stress climatique.....	35
3.3	Effets du lombricompost et des vers de terre sur la croissance et la capacité d'adaptation du riz en situation de stress climatique.....	36
3.3.1	Situation de stress thermique .....	36
3.3.2	Situation de stress hydrique .....	38
3.3.3	Situation de stress thermique et hydrique combiné .....	39
3.4	Limites de l'étude et perspectives .....	41
	CONCLUSION.....	42
	BIBLIOGRAPHIE .....	i
	LISTES DES ANNEXES .....	x