



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ KASDI MERBAH – OUARGLA
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département : Sciences Biologiques

Mémoire de Fin d'Études
Master Académique

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie
Filière : Biotechnologie
Spécialité : Biotechnologie végétale

Présenté par :

Mlle Assal Ikram

Thème :

**Évaluation du potentiel allélopathique de *Cynanchum acutum* L.
sur la multiplication végétative de *Cynodon dactylon* (L.) Pers. et
Phragmites australis (Cav.) Trin. ex Steud. dans les palmeraies du
Sud-Est algérien (Ouargla)**

Soutenu publiquement le : 18/06/2026

Devant le jury :

Qualité	Nom et Prénom	Grade	Établissement
Présidente	Mme Bissati S.	Professeur	UKM Ouargla
Examinatrice	Mme Mimouni Y.	MCA	UKM Ouargla
Encadrant	M Eddoud A.	MAA	UKM Ouargla

Année Universitaire : 2025/2026

Remerciements

Je remercie Dieu pour qui m'a guidé sur la voie du savoir, m'a insufflé la patience et la persévérance, et m'a accordé la grâce d'accomplir ce travail de recherche.

En guise de reconnaissance, je tiens à exprimer mes sincères remerciements à :

Monsieur Ammar Eddoud, mon honorable encadreur, pour sa bienveillance, sa rigueur scientifique et la confiance qu'il m'a accordée. Ses conseils précieux ont été un pilier fondamental pour la réalisation de cette étude.

Madame Bissati S., Présidente du jury, qui a accepté avec noblesse de présider cette soutenance et d'apporter son regard expert sur ce travail.

Madame Mimouni Y., Examinatrice, pour l'honneur qu'elle me fait en acceptant d'évaluer cette recherche et pour l'intérêt qu'elle porte à ce modeste travail.

J'adresse également mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance au Monsieur Chaabana A., Monsieur Sekour M., Madame Tellli A. et Madame Kharbouche Y., ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À la source de toute générosité et à la lumière de mes yeux, mes très chers parents, À ceux dont les prières m'ont toujours accompagnée et dont les sacrifices ont tracé mon chemin. À mon soutien indéfectible et à ma plus grande fierté, sans qui je n'aurais jamais pu atteindre ce stade, je dédie ce travail en témoignage de ma profonde reconnaissance et de mon immense gratitude pour tous leurs efforts.

À mes chères sœurs, Hanane et Chourouk, Qui ont toujours été pour moi un refuge chaleureux et un soutien précieux, et dont les encouragements m'ont accompagnée à chaque étape de mon parcours.

À mes chers frères, Ezzeddine, Walid, Mehdi et Diaa, Dont la présence m'a toujours donné force et courage, et dont l'affection sincère et le soutien constant ont renforcé ma confiance et ma détermination.

À mes collègues et amies, proches ou lointaines, en particulier Hadjer et Widad, Compagnes de route et de réussite, qui ont partagé avec moi les moments d'effort et de persévérance, et qui ont illuminé ce parcours par leur soutien, leur encouragement et leur esprit de coopération.

À vous tous, Je dédie le fruit de ce travail avec toute mon affection, mon estime et ma profonde gratitude.

Liste des abréviations

Abréviations	Signification
*	Effet significatif au seuil $p < 0,05$.
**	Effet hautement significatif au seuil $p < 0,01$.
***	Effet très hautement significatif au seuil $p < 0,001$.
ABA	Acide abscissique.
APX	Ascorbate peroxydase.
ATP	Adénosine triphosphate.
AUC	Area Under the Curve ; aire sous la courbe.
BH	Correction de Benjamini-Hochberg.
C4	Type photosynthétique en C4.
CAT	Catalase.
cm	Centimètre.
D0	Dose témoin : 0 g de poudre / 100 g de sable.
D1	Dose faible : 1,75 g de poudre / 100 g de sable.
D2	Dose intermédiaire : 2,5 g de poudre / 100 g de sable.
D3	Dose forte : 5 g de poudre / 100 g de sable.
ddl	Degrés de liberté.
DE50	Dose efficace provoquant 50 % d'effet.
DE90	Dose efficace provoquant 90 % d'effet.
FDR	False Discovery Rate ; taux de fausses découvertes.
g/100 g	Grammes de poudre pour 100 g de sable.
g/L	Grammes par litre.
H2O2	Peroxyde d'hydrogène.
HPLC	Chromatographie liquide haute performance.
IAA	Acide indole-3-acétique.
ICR	Inhibition de la longueur racinaire.
ICV	Inhibition de la longueur végétative.
IR	Inhibition du nombre de racines par rapport au témoin.
IV	Inhibition du nombre de pousses par rapport au témoin.
J21	Vingt-et-unième jour d'observation.
LC-MS/MS	Chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem.
LR	Longueur moyenne des racines adventives.
LV	Longueur moyenne des émissions végétatives.
m/v	Masse par volume.
MDA	Malondialdéhyde.
mm	Millimètre.
n	Effectif ou nombre d'unités expérimentales.
NERF	Nombre d'émissions racinaires par fragment.
NERF/nœud	Nombre d'émissions racinaires par nœud.
NEVF	Nombre d'émissions végétatives par fragment.
NEVF/nœud	Nombre d'émissions végétatives par nœud.

NR	Nombre total de racines adventives émises par fragment.
ns	Non significatif.
NV	Nombre total d'émissions végétatives.
O2-	Anion superoxyde.
p	Valeur de significativité statistique.
POD	Peroxydase.
ROS	Espèces réactives de l'oxygène.
SE	Erreur standard de la moyenne.
SM	Solution mère aqueuse préparée à partir de poudre foliaire de <i>Cynanchum acutum</i> .
SOD	Superoxyde dismutase.
T_1,75g	Traitement de l'essai en pots correspondant à 1,75 g de poudre / 100 g de sable.
T_2,5g	Traitement de l'essai en pots correspondant à 2,5 g de poudre / 100 g de sable.
T_5g	Traitement de l'essai en pots correspondant à 5 g de poudre / 100 g de sable.
T0	Traitement témoin de l'essai 1 : eau distillée, 0 g/L.
T100	Traitement de l'essai 1 : solution mère non diluée, équivalent à 100 g/L.
T25	Traitement de l'essai 1 : 25 % de solution mère, équivalent à 25 g/L.
T50	Traitement de l'essai 1 : 50 % de solution mère, équivalent à 50 g/L.
T75	Traitement de l'essai 1 : 75 % de solution mère, équivalent à 75 g/L.
tr/min	Tours par minute.
TTC	Chlorure de triphényltétrazolium.
v/v	Volume par volume.
χ^2	Statistique du test de Kruskal-Wallis.

Liste des figures

Numéro de la figure	Titre de la figure	Page
Figure 1	Évolution temporelle des émissions racinaires sous l'effet de l'extrait aqueux.	23
Figure 2	Évolution temporelle des émissions végétatives sous l'effet de l'extrait aqueux.	24
Figure 3	Évolution temporelle du nombre total d'émissions.	25
Figure 4	Heatmap de l'inhibition totale finale par rapport au témoin.	26
Figure 5	Répartition des types biologiques de réponse au dernier jour d'observation.	27
Figure 6	Comparaison des traitements sur l'AUC totale chez <i>C. dactylon</i> .	30
Figure 7	Comparaison des traitements sur l'AUC totale standardisée par nœud chez <i>C. dactylon</i> .	30
Figure 8	Comparaison des traitements sur l'AUC totale chez <i>P. australis</i> .	31
Figure 9	Comparaison des traitements sur l'AUC totale standardisée par nœud chez <i>P. australis</i> .	32
Figure 10	Comparaison statistique des émissions totales à J21 chez <i>C. dactylon</i> .	34
Figure 11	Comparaison statistique des émissions totales à J21 chez <i>P. australis</i> .	34
Figure 12	Relation entre émissions racinaires et végétatives chez <i>C. dactylon</i> au dernier jour.	39
Figure 13	Relation entre émissions racinaires et végétatives chez <i>P. australis</i> au dernier jour.	40
Figure 14	Effet des poudres de <i>C. acutum</i> sur les émissions racinaires.	44
Figure 15	Effet des poudres de <i>C. acutum</i> sur les émissions végétatives.	45
Figure 16	Effet des poudres de <i>C. acutum</i> sur les émissions totales.	46
Figure 17	Effet des poudres de <i>C. acutum</i> sur la longueur racinaire.	47
Figure 18	Effet des poudres de <i>C. acutum</i> sur la longueur végétative.	48
Figure 19	Inhibition des émissions racinaires, végétatives et totales par rapport au témoin.	50
Figure 20	Inhibition des longueurs racinaires, végétatives et totales.	51
Figure 21	Carte thermique de l'émission totale moyenne.	51
Figure 22	Carte thermique de l'inhibition totale par rapport au témoin.	52
Figure 23	Répartition des types biologiques de réponse.	53
Figure 24	Relation entre les émissions racinaires et végétatives chez <i>C. dactylon</i> .	60
Figure 25	Relation entre les émissions racinaires et végétatives chez <i>P. australis</i> .	61

Liste des tableaux

Numéro du tableau	Titre du tableau	Page
Tableau 01	Matériels biologique utilisée	7
Tableau 02	Matériels de terrain et de laboratoire utilisés	8
Tableau 03	Lots de poudres de <i>C. acutum</i> utilisés dans les essais allélopathiques	12
Tableau 04	Dilutions de la solution mère aqueuse de <i>C. acutum</i> utilisées dans l'essai 1.	14
Tableau 05	Nombre de fragments et de nœuds observés dans l'essai en solution aqueuse.	15
Tableau 06	Variables de reprise racinaire et végétative suivies dans l'essai 1.	17
Tableau 07	Doses de poudre de <i>C. acutum</i> appliquées dans l'essai en pots.	19
Tableau 08	Structure factorielle et nombre total d'unités expérimentales de l'essai en pots.	19
Tableau 09	Variables mesurées et indicateurs d'inhibition utilisés pour évaluer la reprise végétative dans l'essai en pots.	20
Tableau 10	Réponses finales à J21 : émissions racinaires, végétatives, totales et inhibition totale par rapport au témoin.	25
Tableau 11	Réponse temporelle globale : AUC racinaire, végétative et totale.	29
Tableau 12	Validation statistique des réponses finales à J21 par le test de Kruskal-Wallis	33
Tableau 13	Validation statistique des réponses temporelles intégrées par AUC.	35
Tableau 13a	Comparaisons post-hoc de Dunn entre chaque concentration et le témoin pour les variables finales à J21.	36
Tableau 13b	Comparaisons post-hoc de Dunn entre chaque concentration et le témoin pour les variables intégrées par AUC.	37
Tableau 14	Réponses biologiques principales (moyenne $\pm$ erreur standard).	42
Tableau 15	Inhibition (%) des émissions et des longueurs par rapport au témoin.	49
Tableau 16a	Synthèse du modèle global non paramétrique : effets plante cible, partie de <i>C. acutum</i> et traitement.	55
Tableau 16b	Effet du traitement dans chaque combinaison plante cible $\times$ partie de <i>C. acutum</i> (Kruskal-Wallis).	56
Tableau 16c	Comparaisons post-hoc de Dunn entre le témoin et chaque dose de <i>C. acutum</i> ; p ajustées FDR et niveau de significativité.	58
Tableau 17	Synthèse statistique des effets traitement les plus structurants.	62

Table des matières

Introduction	1
I. Matériels et méthodes	5
I.1. Objectifs et approche expérimentale de l'étude	5
I.1.1. Objectif général et contexte méthodologique	5
I.1.2. Organisation générale des deux essais	5
I.1.3. Objectifs spécifiques et socle bibliographique	5
I.2. Matériels biologiques	6
I.2.1. Matériel source : <i>C. acutum</i> L.	6
I.2.2. Matériels cibles : <i>C. dactylon</i> et <i>P. australis</i>	7
I.3. Matériels de terrain et de laboratoire utilisés	8
I.4. Collecte, préparation et conservation des poudres de <i>C. acutum</i> L.	9
I.4.1. Collecte du matériel végétal source	9
I.4.2. Nettoyage, séparation des lots et séchage	9
I.4.3. Broyage, tamisage et conservation	10
I.5. Méthodologie de l'essai 1 : effet de la solution aqueuse foliaire	11
I.5.1. Principe expérimental	11
I.5.2. Préparation de la solution mère	11
I.5.3. Préparation des rhizomes cibles	12
I.5.4. Dispositif expérimental	12
I.5.5. Observations et variables mesurées	12
I.6. Méthodologie de l'essai 2 : effet des poudres incorporées au substrat	13
I.6.1. Principe expérimental	13
I.6.2. Pots, substrat et installation	13
I.6.3. Préparation des rhizomes cibles	14
I.6.4. Traitements	14
I.6.5. Conditions d'incubation	15
I.6.6. Observations et variables mesurées	15
I.7. Exploitation des résultats	16
I.7.1. Structuration des bases de données	16
I.7.2. Statistiques descriptives	16
I.7.3. Indices d'inhibition et variables dérivées	16
I.7.4. Choix des tests statistiques	17
I.7.5. Représentations graphiques	17
I.7.6. Précautions d'interprétation	18
II. Résultats et discussions	23
II.1. Effet de l'extrait aqueux de <i>C. acutum</i> sur la reprise végétative de <i>C. dactylon</i> et <i>P. australis</i>	23
II.1.1. Présentation des résultats	23
II.1.2. Interprétation	27
Analyse intégrée de la dynamique temporelle par AUC	28
II.1.3. Validation par les résultats statistiques	32
II.1.4. Discussion partielle	39

II.2. Effet des poudres de feuilles et de plante entière de <i>C. acutum</i> sur la reprise végétative de <i>C. dactylon</i> et <i>P. australis</i>	41
II.2.1. Présentation des résultats biologiques	41
II.2.2. Interprétation des résultats biologiques	47
II.2.2.1. Réponse dose- phytotoxicité cumulative.....	47
II.2.2.2. Hiérarchie de sensibilité	51
II.2.3. Comparaison entre feuilles et plante entière de <i>C. acutum</i>	52
II.2.3.1. Réponse de <i>C. dactylon</i>	53
II.2.3.2. Réponse de <i>P. australis</i>	53
II.2.4. Validation par les résultats statistiques.....	53
II.2.4.1. Effets des traitements sur les variables biologiques	54
II.2.4.2. Comparaisons post-hoc entre les doses et le témoin	57
II.2.4.3. Corrélations entre émissions racinaires et végétatives	59
II.4. Discussion partielle	63
II.3. Discussion générale enrichie et actualisée.....	66
II.3.1. Portée générale des résultats et originalité physiologique de l'étude	66
II.3.2. Cadre allélopathique actuel : des métabolites végétaux aux bioherbicides	67
II.3.3. Modèle physiologique de la reprise végétative des rhizomes.....	68
II.3.4. Hypothèse 1 : perturbation précoce de la rhizogenèse adventive	69
II.3.5. Hypothèse 2 : inhibition du débourrement nodal et rupture du programme racine-pousse ...	70
II.3.6. Hypothèse 3 : stress oxydatif, membranes et respiration comme cibles transversales	71
II.3.7. Hypothèse 4 : mobilisation des réserves rhizomateuses et épuisement du fragment.....	72
II.3.8. Hypothèse 5 : spécificité feuilles versus plante entière	72
II.3.9. Hypothèse 6 : différences de sensibilité entre <i>Cynodon dactylon</i> et <i>Phragmites australis</i> ...	73
II.3.10. Effet dose, seuil physiologique et possible hormone.....	74
II.3.11. Différence entre extrait aqueux et poudre : disponibilité chimique et interaction avec le substrat	75
II.3.12. Interprétation agroécologique pour les palmeraies de Ouargla.....	76
II.3.13. Limites scientifiques et hypothèses à vérifier	76
II.3.14. Modèle intégrateur proposé	77
II.3.15. Perspectives expérimentales prioritaires	78
Conclusion.....	80
Recommandations.....	81
Références Bibliographiques	

Introduction

Introduction

Les agroécosystèmes oasiens du Sahara septentrional constituent des espaces agricoles originaux, fragiles et hautement stratégiques, où la production végétale dépend d'un équilibre étroit entre les ressources hydriques, la qualité des sols, la biodiversité cultivée, la disponibilité de la matière organique et la maîtrise des contraintes biotiques. Dans les régions sahariennes algériennes, la palmeraie n'est pas seulement un système de production centré sur le palmier dattier ; elle constitue un agroécosystème pluristratifié associant cultures intercalaires, réseaux d'irrigation, microclimats artificiellement entretenus, flore spontanée et biodiversité fonctionnelle. Cette organisation verticale et spatiale confère aux palmeraies une valeur agronomique, écologique et socioéconomique majeure (Munier, 1973 ; Toutain, 1979 ; Ferry et al., 1998 ; Zaid et de Wet, 2002). Toutefois, ces systèmes sont soumis à une pression croissante liée à la salinisation, à la dégradation structurale des sols, aux contraintes phytosanitaires et à l'envahissement par des adventices vivaces fortement compétitives (Radosevich et al., 2007 ; Monaco et al., 2002 ; Zimdahl, 2018 ; Lamichhane et al., 2020).

Dans un contexte de biotechnologie végétale, ces contraintes ne doivent pas être abordées uniquement comme des problèmes agronomiques classiques. Elles constituent aussi un champ de recherche appliquée permettant de valoriser les ressources végétales locales, d'identifier des biomolécules d'intérêt, de développer des bioessais pertinents et d'ouvrir la voie à des bioproduits compatibles avec la protection durable des cultures. La biotechnologie végétale contemporaine ne se limite pas à la culture *in vitro*, à la micropropagation ou à l'amélioration génétique. Elle englobe également l'étude des métabolites secondaires, la bioprospection, le criblage d'activités biologiques, la caractérisation des interactions plante-plante, l'écophysiologie du stress et la formulation de biopesticides, biostimulants ou bioherbicides d'origine végétale (Harborne, 1998 ; Wink, 2010 ; Macías et al., 2004 ; Duke et al., 2000 ; Dayan et Duke, 2014 ; Isman, 2020). Dans ce cadre, l'exploitation raisonnée de plantes spontanées constitue une voie scientifique prometteuse pour concilier innovation biotechnologique, réduction des intrants chimiques et gestion agroécologique des palmeraies.

Parmi les mauvaises herbes les plus problématiques des systèmes irrigués chauds et des palmeraies sahariennes, les espèces pérennes à multiplication végétative occupent une place particulière. Leur nuisibilité résulte moins de la seule production de graines que de leur aptitude à se maintenir par rhizomes, stolons, fragments nodaux et bourgeons de régénération. Ces organes leur permettent de survivre aux perturbations mécaniques, de recoloniser rapidement les parcelles et d'exercer une concurrence durable pour l'eau, les nutriments, la lumière et l'espace (Holm et al., 1977 ; Harper, 1977 ; Grime, 2001 ; Radosevich et al., 2007). Deux espèces constituent à cet égard des modèles particulièrement pertinents : *Cynodon dactylon* (L.) Pers., graminée stolonifère et rhizomateuse largement reconnue comme l'une des adventices agricoles les plus difficiles à contrôler, et *Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex Steud., héliophyte rhizomateuse vigoureuse capable de coloniser drains, bordures humides, zones irriguées et milieux perturbés (Haslam, 1972 ; Holm et al., 1977 ; Mal et Narine, 2004 ; Hazelton et al., 2014 ; Kiviat, 2013).

La biologie clonale de ces espèces explique la difficulté de leur gestion. Chez les plantes rhizomateuses, chaque fragment viable porteur d'un nœud peut devenir une unité de régénération

indépendante. Le nœud associe des bourgeons, des primordia racinaires, des tissus méristématiques et des réserves mobilisables, ce qui lui permet de produire de nouvelles racines et de nouvelles pousses après fragmentation. Le travail du sol peut donc parfois aggraver l'infestation en divisant les organes souterrains et en dispersant des propagules végétatives. Les synthèses récentes sur *C. dactylon* soulignent que les recherches sur les méthodes alternatives au désherbage chimique ont fortement progressé, mais que les essais restent souvent conduits en conditions contrôlées, avec un manque d'observations en systèmes de production réels; elles confirment également l'importance des approches allélopathiques et des paillis organiques, tout en rappelant le risque de dissémination lié au travail mécanique du sol (Soares et al., 2023).

Cette réalité impose d'évaluer la lutte contre les adventices vivaces non seulement par la mortalité apparente ou la réduction de biomasse aérienne, mais par des indicateurs fonctionnels de reprise végétative. Le nombre d'émissions racinaires, le nombre d'émissions végétatives, les émissions totales, la longueur racinaire, la longueur végétative, la longueur totale et les valeurs rapportées au nœud initial constituent des variables biologiquement robustes pour mesurer la capacité d'un fragment à reconstituer une architecture complète racine-pousse. Ces indicateurs traduisent la vigueur méristématique, la mobilisation des réserves, la polarité morphogénétique, la coordination entre organogenèse racinaire et caulinaire, ainsi que l'aptitude à l'installation clonale (Harper, 1977; Fitter et Hay, 2002; Lambers et al., 2008; Taiz et al., 2015). Dans une lecture biotechnologique, ces variables deviennent des marqueurs phénotypiques de réponse à un stress phytotoxique d'origine végétale.

L'allélopathie représente un domaine central pour ce type d'approche. Introduite par Molisch (1937), elle désigne les effets biochimiques, directs ou indirects, d'une plante sur une autre par l'intermédiaire de composés libérés dans l'environnement. Ces composés, appelés allelochimiques, peuvent être produits par lixiviation des parties aériennes, volatilisation, exsudation racinaire, décomposition des résidus ou transformation microbienne de la matière organique (Rice, 1984; Putnam et Tang, 1986; Inderjit et Duke, 2003; Reigosa et al., 2006). Selon leur nature, leur concentration, la sensibilité de l'espèce cible et les conditions édaphiques, ils peuvent inhiber ou stimuler la germination, la croissance racinaire, l'élongation caulinaire, la photosynthèse, la respiration, l'absorption minérale, l'activité enzymatique et l'équilibre hormonal (Einhellig, 1995; Weir et al., 2004; Cheng et Cheng, 2015; Li et al., 2010).

Les connaissances récentes confirment l'intérêt de l'allélopathie comme outil de gestion des mauvaises herbes et comme source de molécules naturelles à potentiel herbicide. Les revues actuelles insistent sur l'intérêt des allelochimiques comme composés phytotoxiques pouvant contribuer à la gestion intégrée des adventices, en particulier dans un contexte d'évolution des résistances aux herbicides et de demande sociétale pour des pratiques plus écologiques (Khamare et al., 2022; Hasan et al., 2021; Islam et al., 2024). Elles rappellent cependant que l'efficacité des extraits ou poudres végétales dépend de nombreux facteurs : espèce donneuse, organe utilisé, dose appliquée, mode de préparation, stabilité des composés, solubilité, biodégradation, activité microbienne du sol et conditions environnementales. C'est précisément cette complexité qui justifie une phase préalable de criblage biologique rigoureux avant toute perspective de formulation bioherbicide (Cordeau et al., 2016; Duke, 2022; Zhang et al., 2025).

Du point de vue de la biotechnologie végétale appliquée, les plantes spontanées riches en métabolites secondaires constituent une ressource majeure pour la bioprospection. Les composés phénoliques, flavonoïdes, tanins, coumarines, quinones, terpénoïdes, alcaloïdes, saponines et glycosides peuvent intervenir dans les interactions chimiques entre plantes et présenter des activités phytotoxiques, antimicrobiennes, antioxydantes ou cytotoxiques (Harborne, 1998 ; Wink, 2010 ; Macías et al., 2004 ; Isman, 2020). Les bioherbicides d'origine végétale sont ainsi envisagés comme des outils potentiels pour réduire la dépendance aux herbicides de synthèse, même si leur transfert vers le terrain demeure conditionné par la reproductibilité de l'activité, la sélectivité vis-à-vis des cultures, la stabilité des formulations, le coût de production et l'évaluation écotoxicologique (Dayan et al., 2009 ; Hasan et al., 2021 ; Ammar et al., 2023 ; Dolianitis et al., 2025).

Dans cette perspective, *Cynanchum acutum* L., liane vivace de la famille des Apocynaceae, présente un intérêt scientifique particulier. Cette espèce spontanée est observée dans divers milieux méditerranéens et sahariens, notamment dans les zones humides, les bordures, les haies et les palmeraies. Comme plusieurs Apocynaceae, elle est susceptible d'accumuler des familles chimiques biologiquement actives. Des travaux phytochimiques et pharmacologiques ont signalé chez *C. acutum* ou dans ses organes la présence de flavonoïdes, terpènes, tanins, résines, composés phénoliques, saponines, alcaloïdes, coumarines et glycosides, avec des activités biologiques variables selon les extraits et les organes étudiés (Abu Ziada et al., 2016; Soliman et al., 2022; Kadhim et Saadedin, 2024). Ces données appuient l'hypothèse selon laquelle cette plante peut constituer une matrice de composés bioactifs à explorer dans des essais de phytotoxicité ou d'allélopathie.

L'intérêt de *C. acutum*, dans la présente étude, est donc double. D'une part, l'espèce est considérée comme une ressource végétale locale pouvant être transformée en poudre ou en extrait, ce qui s'inscrit dans une logique de valorisation des biomasses spontanées sahariennes. D'autre part, sa richesse présumée en métabolites secondaires permet de la considérer comme plante donneuse dans un protocole de criblage bioherbicide. L'utilisation de poudre de feuilles et de poudre de plante entière permet de tester l'effet global de matrices végétales contrastées, sans réduire prématurément l'activité observée à une molécule isolée. Cette stratégie est cohérente avec les travaux récents soulignant que les bioherbicides naturels sont souvent des mélanges complexes dont l'action peut résulter d'effets additifs, synergiques ou multi-cibles (Ammar et al., 2023 ; Islam et al., 2024 ; Zhang et al., 2025).

La particularité de cette recherche réside également dans le choix des espèces cibles et du stade biologique étudié. La majorité des bioessais allélopathiques utilisent des graines ou de jeunes plantules, car ces modèles sont faciles à standardiser. Or, dans le cas de *C. dactylon* et de *P. australis*, le problème agronomique majeur dans les palmeraies réside dans la régénération végétative à partir des fragments. Tester l'effet d'une poudre végétale sur les émissions racinaires et végétatives issues de nœuds ou de fragments rhizomateux permet donc de rapprocher le bioessai des conditions réelles d'infestation. Cette orientation donne à l'étude une valeur méthodologique importante : elle transforme le fragment végétatif en système biologique de détection de l'activité phytotoxique, capable de révéler les effets sur l'organogenèse, l'allongement et la coordination racine-pousse.

L'approche adoptée s'inscrit ainsi dans la continuité des recherches sur les alternatives biologiques et végétales aux herbicides de synthèse, tout en répondant à un besoin local de gestion des adventices vivaces dans les agroécosystèmes sahariens. Elle se situe à l'interface de la malherbologie, de l'écologie chimique, de la physiologie végétale et de la biotechnologie végétale. Elle permet de relier une ressource végétale spontanée, *C. acutum*, à une problématique appliquée de protection des cultures, à travers des indicateurs morphogénétiques quantifiables et statistiquement exploitables. Elle ouvre également la voie à des développements ultérieurs : dosage des polyphénols et flavonoïdes totaux, chromatographie et identification des composés actifs, tests de fractionnement, bioessais sur cultures non cibles, étude de la persistance dans le sol, analyse des réponses oxydatives et enzymatiques, essais en conditions semi-contrôlées, puis formulation éventuelle de bioproduits.

Dans ce contexte, l'objectif général de notre étude est d'évaluer le potentiel bioherbicidal et allélopathique de *C. acutum* sur la multiplication végétative de *C. dactylon* et de *P. australis*. Plus spécifiquement, il s'agit de caractériser l'effet de doses croissantes de poudre végétale sur les émissions racinaires, les émissions végétatives, les émissions totales et les longueurs; de comparer la sensibilité des deux espèces cibles; d'analyser les différences entre poudre de feuilles et poudre de plante entière; et de discuter les résultats dans une perspective de valorisation biotechnologique des ressources végétales locales. En plaçant la régénération clonale au centre de l'analyse, cette étude cherche à produire des connaissances utiles à la fois pour la compréhension biologique des réponses des adventices vivaces et pour le développement futur de stratégies de désherbage écologique adaptées aux palmeraies sahariennes.

Au-delà de son intérêt expérimental immédiat, cette étude contribue à une réflexion plus large sur la transition vers des systèmes de protection des cultures fondés sur les ressources biologiques, la réduction des intrants de synthèse et la valorisation des potentialités locales. L'intégration de poudres végétales ou d'extraits allélopathiques ne doit pas être envisagée comme une solution isolée et universelle, mais comme une composante possible de la gestion intégrée des mauvaises herbes, à associer aux pratiques culturales, au paillage, à la gestion de l'irrigation, à la surveillance des foyers d'infestation et à la limitation de la fragmentation-dissémination des rhizomes. Dans les palmeraies, où la durabilité dépend de l'équilibre entre productivité, économie de l'eau, préservation des sols et réduction de la pression chimique, l'exploration du potentiel de *C. acutum* représente une contribution originale à la biotechnologie végétale appliquée à la protection durable des cultures.

Matériel et méthodes

I. Matériels et méthodes

I.1. Objectifs et approche expérimentale de l'étude

I.1.1. Objectif général et contexte méthodologique

Cette étude vise à caractériser, dans des conditions de laboratoire contrôlées ou semi-contrôlées, l'effet allélopathique potentiel de *C. acutum* L. sur la reprise végétative de deux adventices rhizomateuses majeures des palmeraies de Ouargla (Sud-Est algérien) : *C. dactylon* (L.) Pers. et *P. australis* (Cav.) Trin. Le choix de cette problématique s'inscrit dans le contexte de la recherche de leviers alternatifs à la lutte chimique, en particulier dans les agroécosystèmes oasiens où les adventices vivaces, la salinité, la rareté de l'eau et la fragilité du sol imposent une gestion prudente des intrants (Putnam & Duke, 1978 ; Rice, 1984 ; Weston, 1996 ; Duke et al., 2000 ; Singh et al., 2003 ; Macías et al., 2007 ; Zimdahl, 2018 ; Chauhan, 2020).

L'objectif général est de déterminer si les produits dérivés de *C. acutum*, préparés sous forme de solution aqueuse ou de poudre végétale incorporée au substrat, sont capables de modifier la capacité de régénération des fragments rhizomateux. La régénération est appréciée à travers l'émission de racines adventives, l'émission de jeunes pousses et, dans l'essai en pots, la croissance longitudinale des organes néoformés. Cette orientation méthodologique est justifiée par le rôle central des nœuds et des bourgeons de réserve dans la survie des plantes clonales et rhizomateuses (Horowitz, 1972 ; Haslam, 1972 ; de Kroon & van Groenendael, 1997 ; Klimes et al., 1997 ; Klimesova & Klimes, 2007 ; Klimesova & de Bello, 2009 ; Čuda et al., 2021).

I.1.2. Organisation générale des deux essais

Deux essais complémentaires ont été mis en place. Le premier essai, conduit en solution aqueuse, cherche à évaluer l'action des composés hydrosolubles extraits de la poudre foliaire de *C. acutum*. Ce type de bioessai est fréquemment utilisé comme étape exploratoire pour détecter un potentiel phytotoxique, construire des relations concentration-réponse et isoler l'effet d'un extrait de l'effet physique du substrat (Inderjit & Nilsen, 2003 ; Reigosa et al., 2006 ; Belz, 2007 ; Batish et al., 2008 ; Motalebnejad et al., 2023 ; Solodka et al., 2025). Le second essai, conduit en pots sur sable de dune, permet d'étudier l'effet direct de la poudre végétale appliquée au voisinage des rhizomes, dans un micro-système plus proche des conditions d'un substrat minéral oasien (Toutain, 1979 ; Liebman et al., 2001 ; Bond & Grundy, 2001 ; Dubost, 2002 ; Hatcher & Melander, 2003 ; Blum, 2011).

I.1.3. Objectifs spécifiques et socle bibliographique

Les objectifs spécifiques sont : (i) préparer et standardiser deux formes de biomasse sèche de *C. acutum*, à savoir la poudre foliaire et la poudre de plante entière ; (ii) tester l'effet de concentrations croissantes d'une solution aqueuse foliaire sur la reprise de fragments de rhizomes ; (iii) tester l'effet de doses croissantes de poudre végétale dans un substrat sableux ; (iv) comparer la sensibilité de *C. dactylon* et *P. australis* ; et (v) produire des indicateurs quantitatifs d'inhibition racinaire et végétative exploitables statistiquement et agronomiquement (Quinn & Keough, 2002 ; Ranal & Santana, 2006 ; Zuur et al., 2010 ; Ritz et al., 2015).

Le socle bibliographique intégré à cette méthodologie mobilise explicitement les travaux fondateurs et appliqués consacrés à l'allélopathie, à la phytotoxicité et aux extraits végétaux (Molisch, 1937 ; Putnam & Duke, 1978 ; Rice, 1984 ; Aliotta et al., 1993 ; Einhellig, 1995, 1996 ; Weston, 1996

; An et al., 1998 ; Kohli et al., 1998 ; Chou, 1999 ; Reigosa et al., 1999 ; Duke et al., 2000 ; Bhowmik & Inderjit, 2003 ; Ferguson & Rathinasabapathi, 2003 ; Inderjit & Duke, 2003 ; Inderjit & Nilsen, 2003 ; Singh et al., 2003 ; Weston & Duke, 2003 ; Narwal, 2004 ; Weir et al., 2004 ; Chou, 2006 ; Reigosa et al., 2006 ; Belz, 2007 ; Macías et al., 2007 ; Batish et al., 2008 ; Macías et al., 2008 ; Dayan et al., 2009, 2010 ; Blum, 2011 ; Inderjit et al., 2011 ; Belz & Duke, 2014 ; Duke, 2015).

La justification agronomique et écologique repose également sur les références relatives à la gestion des adventices, aux plantes clonales et aux espèces rhizomateuses cibles (Rochecouste, 1962, 1967 ; Haslam, 1972 ; Horowitz, 1972 ; Haslam, 1973 ; Horowitz, 1973 ; Holm et al., 1977 ; Grace, 1989 ; Marks et al., 1994 ; Horowitz, 1996 ; Dong et al., 1996 ; de Kroon & van Groenendael, 1997 ; Cudney et al., 1997 ; Holm et al., 1997 ; Klimes et al., 1997 ; Chambers et al., 1999 ; Meyerson et al., 2000 ; Ailstock et al., 2001 ; Bond & Grundy, 2001 ; Liebman et al., 2001 ; Saltonstall, 2002 ; Monaco et al., 2002 ; Hatcher & Melander, 2003 ; Klimesova & Klimes, 2007 ; Radosevich et al., 2007 ; Klimesova & de Bello, 2009 ; Mahmoodzadeh et al., 2010 ; Kettenring & Mock, 2012 ; Heap, 2014 ; Uddin et al., 2014 ; Uddin et al., 2017 ; Zimdahl, 2018 ; Chauhan, 2020 ; Čuda et al., 2021).

La contextualisation floristique, saharienne et méthodologique s'appuie enfin sur les sources relatives à *C. acutum*, à la flore algérienne et aux méthodes d'analyse expérimentale (Tukey, 1949 ; Kruskal & Wallis, 1952 ; Levene, 1960 ; Quézel & Santa, 1962 ; Dunn, 1964 ; Shapiro & Wilk, 1965 ; Finney, 1971 ; Tutin et al., 1972 ; Ghahreman, 1979 ; Toutain, 1979 ; Sokal & Rohlf, 1995 ; Benjamini & Hochberg, 1995 ; Le Houérou, 1995 ; Aidoud, 1997 ; Underwood, 1997 ; Munzuroglu & Geckil, 2002 ; Quinn & Keough, 2002 ; Dubost, 2002 ; Ozenda, 2004 ; Box et al., 2005 ; Benhouhou, 2005 ; Ranal & Santana, 2006 ; Zuur et al., 2009, 2010 ; Hussain et al., 2011 ; Bewley et al., 2013 ; Crawley, 2013 ; Gotelli & Ellison, 2013 ; Vaziritabar et al., 2014 ; Ritz et al., 2015 ; ISTA, 2023 ; Bar et al., 2024).

I.2. Matériels biologiques

I.2.1. Matériel source : *C. acutum* L.

Le matériel allélopathique utilisé dans cette étude est constitué par *C. acutum*, plante vivace grimpante appartenant à la famille des Apocynaceae, anciennement rattachée aux Asclepiadaceae selon les traitements taxonomiques classiques. L'espèce est connue dans plusieurs flores méditerranéennes et sahariennes comme une liane herbacée ou subligneuse, à fort pouvoir de colonisation dans les milieux perturbés, les zones irriguées, les bordures de palmeraies et certains habitats humides ou anthropisés (Quézel & Santa, 1962 ; Tutin et al., 1972 ; Ozenda, 2004 ; Bar et al., 2024).

L'intérêt expérimental de *C. acutum* repose sur les indications bibliographiques relatives au potentiel phytotoxique de certaines espèces du genre *Cynanchum* ou de leurs extraits aqueux. Les métabolites secondaires impliqués dans les interactions allélopathiques peuvent inclure des phénols, flavonoïdes, saponines, alcaloïdes, coumarines, terpénoïdes, glycosides et autres composés hydrosolubles ou partiellement solubles (Aliotta et al., 1993 ; Weir et al., 2004 ; Macías et al., 2007 ; Dayan et al., 2009 ; Vaziritabar et al., 2014 ; Bar et al., 2024).

Dans la présente étude, deux lots de biomasse ont été distingués : un lot de feuilles seules et un lot de plante entière. Cette distinction est importante, car la concentration et la nature des composés secondaires peuvent varier selon l'organe végétal, le stade phénologique, la saison, l'origine

géographique et les contraintes écologiques subies par la plante (Einhellig, 1995 ; Kohli et al., 1998 ; Reigosa et al., 1999 ; Singh et al., 2003 ; Narwal, 2004 ; Chou, 2006).

I.2.2. Matériels cibles : *C. dactylon* et *P. australis*

Les espèces cibles sont *C. dactylon* (L.) Pers. et *P. australis* (Cav.) Trin. ex Steud., deux plantes vivaces à multiplication végétative importante, fréquemment signalées dans les milieux agricoles perturbés et les habitats irrigués. Leur capacité de reprise à partir de fragments rhizomateux constitue un facteur majeur de persistance après les opérations de travail du sol, de désherbage mécanique ou de perturbation hydrique (Holm et al., 1977 ; Holm et al., 1997 ; Monaco et al., 2002 ; Radosevich et al., 2007).

C. dactylon, ou chiendent pied-de-poule, est une Poaceae vivace à stolons et rhizomes, reconnue mondialement comme adventice difficile à maîtriser. Sa dynamique clonale, sa tolérance au stress, sa capacité de régénération et la fragmentation de ses organes souterrains expliquent sa forte résilience dans les cultures pérennes, les vergers, les palmeraies et les systèmes irrigués (Rochecoste, 1962, 1967 ; Horowitz, 1972, 1973, 1996 ; Cudney et al., 1997 ; Mahmoodzadeh et al., 2010).

P. australis, ou roseau commun, est une Poaceae rhizomateuse de grande taille, capable de coloniser les habitats humides, les drains, les bordures de seguias, les zones d'accumulation d'eau et certains milieux anthropisés. Sa multiplication végétative à partir de rhizomes et de fragments détachés est bien documentée et représente un mécanisme essentiel de propagation locale et de réinstallation après perturbation (Haslam, 1972, 1973 ; Marks et al., 1994 ; Chambers et al., 1999 ; Meyerson et al., 2000 ; Saltonstall, 2002 ; Kettenring & Mock, 2012 ; Čuda et al., 2021).

Ces deux espèces ont été choisies parce qu'elles représentent deux modèles de mauvaises herbes vivaces à organes de réserve, mais avec des architectures rhizomateuses différentes. Cette différence permet de discuter la sensibilité allélopathique non seulement en termes de toxicité directe, mais aussi en termes de capacité de compensation morphologique, de disponibilité des réserves et d'activation des nœuds (Dong et al., 1996 ; de Kroon & van Groenendael, 1997 ; Klimes et al., 1997 ; Klimesova & Klimes, 2007).

Tableau 01 : Matériels biologique utilisée dans notre étude

Matériel biologique	Rôle dans l'étude	Principales caractéristiques utiles
<i>C. acutum</i>	Matériel source allélopathique	Plante entière et feuilles séchées, broyées, tamisées et conservées séparément.
<i>C. dactylon</i>	Espèce cible	Vivace rhizomateuse et stolonifère ; forte capacité de régénération à partir des nœuds.
<i>P. australis</i>	Espèce cible	Vivace rhizomateuse ; fragments capables de régénération racinaire et caulinaire.

I.3. Matériels de terrain et de laboratoire utilisés

Le matériel de terrain a été mobilisé pour la collecte de *C. acutum* et des rhizomes des espèces cibles dans les palmeraies de la région de Ouargla. Il comprenait notamment une houe pour le déterrage des individus entiers de *C. acutum*, des ciseaux ou sécateurs pour la section des fragments

végétatifs, des sacs ou contenants propres pour le transport, ainsi que des étiquettes permettant d'identifier les lots selon l'origine et la nature du matériel. Le matériel de laboratoire a été choisi afin de garantir le nettoyage, la standardisation, l'extraction aqueuse, la mise en culture expérimentale et les observations morphologiques.

Tableau 02 : Matériels de terrain et de laboratoire utilisés dans notre étude

Catégorie	Matériel utilisé	Fonction expérimentale
Collecte	Houe, ciseaux/sécateur, sacs propres, étiquettes	Déterrage, prélèvement et transport du matériel végétal.
Nettoyage	Eau du robinet, eau distillée, bacs de rinçage	Élimination des poussières, particules de sol et impuretés.
Séchage	Claies, plateaux, local aéré et ombragé	Séchage lent à température ambiante.
Broyage	Broyeur réfrigéré	Réduction du matériel sec en poudre en limitant l'échauffement.
Tamissage	Tamis de laboratoire	Homogénéisation granulométrique de la poudre.
Conservation	Flacons en verre hermétiques, réfrigérateur à 4 °C	Protection contre lumière, humidité et oxydation.
Extraction aqueuse	Agitateur, béchers, erlenmeyers, papier Whatman n°1	Macération agitée et filtration de la solution mère.
Clarification	Centrifugeuse réglée à 3000 tr/min	Séparation des particules fines après extraction.
Essai 1	Bacs en verre, eau distillée, fragments de rhizomes	Exposition aux dilutions de solution aqueuse.
Essai 2	Pots perforés, sable de dune lavé, vaporisateur	Installation en micro-substrat sableux.
Mesures	Règle graduée ou pied à coulisse, fiches de suivi	Comptage et mesure des organes néoformés.

Le choix d'un substrat minéral simple, d'une eau distillée et de contenants propres vise à réduire les facteurs confondants susceptibles de masquer l'effet des traitements. Cette précaution est particulièrement importante dans les bioessais d'allélopathie, où les variations de pH, de salinité, d'osmolarité, de disponibilité en nutriments et de contamination microbienne peuvent provoquer des réponses qui ne relèvent pas strictement de l'activité des composés phytotoxiques (Inderjit & Nilsen, 2003 ; Zuur et al., 2010 ; Blum, 2011 ; Duke, 2015).

I.4. Collecte, préparation et conservation des poudres de *C. acutum* L.

I.4.1. Collecte du matériel végétal source

La collecte de *C. acutum* a été réalisée dans plusieurs palmeraies de la région de Ouargla, notamment dans les zones de Ouargla (palmeraie Université, Ksar, ... etc.) Sidi Khouiled, N'Goussa, Rouissat, Hassi Ben Abdallah et d'autres palmeraies voisines. Les prélèvements ont été effectués entre septembre et décembre 2025, période durant laquelle les plants observés étaient majoritairement au stade de fructification.

Photos 01, 02 et 03 (original, 2025):
Cynanchum acutum L. dans les palmeraies



Photo 01 (Originale,2025)



Photo 02 (Originale,2025)

Les plants ont été déterrés manuellement à l'aide d'une houe afin de récupérer l'ensemble de l'individu, c'est-à-dire la partie aérienne et les organes souterrains. Une quantité importante de matériel végétal, provenant de plusieurs dizaines d'individus, a été collectée, ce qui a permis de constituer une biomasse suffisante pour la préparation des lots expérimentaux. Les plants présentant des symptômes visibles d'attaque phytosanitaire, de pourriture, de nécrose, d'altération avancée ou de dessèchement excessif ont été écartés afin d'éviter que l'état sanitaire initial du matériel source n'introduise une variabilité non contrôlée.



Photo 03 (Originale,2025)

La collecte multi-sites permet d'obtenir un lot représentatif des populations spontanées de *C. acutum* présentes dans les palmeraies de Ouargla, tout en reconnaissant que l'origine environnementale peut influencer la composition en métabolites secondaires. Les effets de l'habitat, du stress hydrique, de la salinité et de la phénologie sur les composés impliqués dans les interactions chimiques entre plantes sont largement discutés dans la littérature sur l'allélopathie (Einhellig, 1995 ; Reigosa et al., 1999 ; Chou, 1999 ; Inderjit & Duke, 2003 ; Weir et al., 2004 ; Bar et al., 2024).

I.4.2. Nettoyage, séparation des lots et séchage

Après leur arrivée au laboratoire, les plants ont été lavés délicatement à l'eau du robinet afin d'éliminer les particules de sol, les poussières, les débris organiques et les impuretés minérales adhérant aux organes aériens et souterrains. Le lavage a été réalisé avec précaution afin d'éviter une perte excessive de matière végétale ou une dégradation mécanique des tissus.



Photo 04 (Originale,2025)



Photo 05 (Originale,2025)

Photos 04 et 05 : Lavage et égouttage du matériel biologique (*C. acutum* L.)

Le matériel végétal propre a ensuite été divisé en deux lots distincts. Le premier lot a été conservé sous forme de plante entière, incluant les parties aériennes et souterraines. Le second lot a été constitué uniquement de feuilles séparées manuellement. Les feuilles constituent souvent un compartiment riche en composés hydrosolubles et facilement lixiviables, tandis que la plante entière peut intégrer des molécules provenant de plusieurs organes (Weston & Duke, 2003 ; Macías et al., 2007 ; Batish et al., 2008 ; Dayan et al., 2009).



Photos 06 et 07 : Lavage et séchage du matériel biologique (*C. acutum* L.)

Photo 06: Lot feuilles (Originale, 2025)

Photo 07 : Lot plante entière (Originale, 2025)

Les deux lots ont été séchés naturellement à l'air libre, à l'ombre et à température ambiante. Le séchage à l'ombre a été retenu afin de limiter les pertes potentielles liées à l'exposition directe au rayonnement solaire et à l'échauffement. Le lot plante entière a été séché pendant plus de deux mois, alors que le lot feuilles seules a été séché pendant environ un mois et demi. Le séchage a été poursuivi jusqu'à l'obtention d'un matériel suffisamment sec, friable et apte au broyage.

I.4.3. Broyage, tamisage et conservation

Après séchage, les deux lots ont été broyés séparément à l'aide d'un broyeur réfrigéré. L'utilisation d'un broyage réfrigéré permet de réduire l'échauffement mécanique et de limiter la dégradation de composés sensibles à la température. Les poudres obtenues ont ensuite été tamisées afin d'obtenir une granulométrie aussi homogène que possible. L'homogénéisation granulométrique est une étape importante, car la taille des particules peut influencer la surface de contact, la vitesse de libération des composés hydrosolubles et l'intensité des interactions avec le substrat (Inderjit & Nilsen, 2003 ; Narwal, 2004 ; Blum, 2011).



Photos 08, 09 et 10 : Broyage réfrigéré du matériel biologique (*C. acutum* L.)

La poudre de feuilles et la poudre de plante entière ont été conservées séparément dans des flacons en verre hermétiques, placés à l'obscurité et maintenus à 4 °C jusqu'à leur utilisation. Cette modalité de conservation vise à limiter l'humidification secondaire, l'oxydation, la photodégradation et les contaminations susceptibles de modifier la qualité biologique des poudres.



Photos 11 et 12 : Conservation du matériel biologique (*C. acutum*)

Tableau 03 : Lots de poudres de *C.acutum* utilisés dans les essais allélopathiques

Lot	Origine	Utilisation dans l'étude	Conservation
Poudre foliaire	Feuilles séchées de <i>C. acutum</i>	Préparation de la solution aqueuse de l'essai 1 ; application directe en pots dans l'essai 2.	Flacons en verre hermétiques, obscurité, 4 °C.
Poudre de plante entière	Parties aériennes et organes souterrains séchés	Application directe en pots dans le second essai, comme modalité « poudre de plante entière ».	Flacons en verre hermétiques, obscurité, 4 °C.

I.5. Méthodologie de l'essai 1 : effet de la solution aqueuse foliaire

I.5.1. Principe expérimental

Le premier essai a été conçu comme un bioessai en solution aqueuse. Il vise à tester l'effet de concentrations croissantes d'une solution préparée à partir de poudre foliaire de *C. acutum* sur la reprise végétative des fragments de rhizomes de *C. dactylon* et *P. australis*. Ce type de dispositif permet d'évaluer la fraction hydrosoluble des substances libérées par le matériel végétal, fraction fréquemment impliquée dans les phénomènes de lixiviation, de décomposition des résidus et

d'interaction chimique dans le sol (Rice, 1984 ; Weston & Duke, 2003 ; Singh et al., 2003 ; Macías et al., 2007 ; Duke, 2015).

I.5.2. Préparation de la solution mère

La préparation de la solution mère aqueuse a été réalisée selon une approche couramment utilisée dans les bioessais allélopathiques, fondée sur l'extraction des composés hydrosolubles par macération ou agitation dans l'eau distillée, suivie d'une filtration, d'une clarification et de dilutions à différentes concentrations expérimentales (Putnam & Duke, 1978 ; Rice, 1984 ; Inderjit & Nilsen, 2003 ; Narwal, 2006/2007 ; Motalebnejad et al., 2023 ; Solodka et al., 2025).

La solution mère aqueuse a été préparée en introduisant 100 g de poudre de feuilles sèches de *C. acutum* dans 1000 mL d'eau distillée. Le mélange a été soumis à une agitation continue pendant 24 h à température ambiante. Après agitation, la suspension a été filtrée afin de séparer la phase liquide des résidus grossiers. Le filtrat obtenu a ensuite été centrifugé à 3000 tr/min pendant 30 min, puis soumis à une seconde filtration. Le volume final a été ajusté avec de l'eau distillée avant utilisation.



Photo 13 : Agitation



Photo 14 : Filtration



Photo 15 : Centrifugation



Photo 15 : Filtration

Photos 13,14, 15 et 16 : Préparation de la solution aqueuse à partir du matériel biologique (*C. acutum* L.)

La solution mère correspond à une concentration massique de 100 g/L, soit 10 % m/v. Elle a été préparée au besoin et utilisée immédiatement après préparation pour éviter toute évolution liée à la conservation, à l'oxydation, à la croissance microbienne ou à la précipitation de certains composés. Les dilutions ont été réalisées à partir de cette solution mère avec de l'eau distillée.



Photos 17 et 18 : Solution mère et dilutions de la solution aqueuse de *C. acutum* L.

Tableau 04 : Dilutions de la solution mère aqueuse de *C. acutum* utilisées dans l'essai 1.

Traitement	Composition	Concentration équivalente
T0	Eau distillée	0 g/L
T25	25 % solution mère + 75 % eau distillée	25 g/L
T50	50 % solution mère + 50 % eau distillée	50 g/L
T75	75 % solution mère + 25 % eau distillée	75 g/L
T100	Solution mère non diluée	100 g/L

I.5.3. Préparation des rhizomes cibles

En parallèle, des rhizomes frais de *C. dactylon* et de *P. australis* ont été récoltés. Les rhizomes ont été triés afin de retenir uniquement des fragments sains, en bon état sanitaire, visiblement intacts et aussi homogènes que possible au sein de chaque espèce. Les fragments ont été sectionnés avec des ciseaux préalablement désinfectés à l'eau de Javel. Pour cet essai, chaque fragment comportait quatre nœuds. Le nombre de nœuds a été retenu comme critère de standardisation prioritaire, car il conditionne le nombre potentiel de sites d'émission racinaire et végétative.



Photo 13 : Rhizomes *P. australis*



Photo 14 : Rhizomes *C. dactylon*



Photo 15 : Fragments *P. australis*



Photo 16 : Fragments *C. dactylon*

Photos 13,14, 15 et 16 : Préparation des rhizomes cibles *C. dactylon* et *P. australis*

Tableau 05 : Nombre de fragments et de nœuds observés dans l'essai en solution aqueuse.

Espèce cible	Fragments par traitement	Nombre de nœuds par fragment	Nombre de traitements	Total fragments
<i>C. dactylon</i>	9	4	5	45
<i>P. australis</i>	7	4	5	35

I.5.4. Dispositif expérimental

Le fragment de rhizome constitue l'unité expérimentale élémentaire. Les différences de nombre de fragments par traitement entre les deux espèces seront prises en compte lors de l'analyse, de préférence en analysant chaque espèce séparément ou en utilisant un modèle intégrant explicitement le facteur espèce.



Photos 17 et 18 : Mise en place essai 1

I.5.5. Observations et variables mesurées

Les fragments de rhizomes ont été exposés aux traitements pendant une période de 21 jours. Les observations ont porté sur le nombre d'émissions racinaires et le nombre d'émissions végétatives par fragment. Le comptage a été réalisé à l'échelle du fragment, chaque fragment représentant une unité de réponse indépendante au traitement. Les deux variables traduisent respectivement la capacité d'installation racinaire et la capacité de reprise aérienne ou caulinaire.



Photos 19 et 20 : Notations et mesures essai 1

Tableau 06 : Variables de reprise racinaire et végétative suivies dans l'essai 1.

Variable	Définition	Unité/Niveau	Interprétation biologique
NERF	Nombre d'émissions racinaires par fragment	Nombre / fragment	Capacité d'enracinement adventif et potentiel d'installation.
NEVF	Nombre d'émissions végétatives par fragment	Nombre / fragment	Activation des bourgeons/nœuds et potentiel de multiplication végétative.
NERF/nœud	NERF divisé par 4	Nombre / nœud	Standardisation selon le nombre de nœuds.
NEVF/nœud	NEVF divisé par 4	Nombre / nœud	Activité végétative moyenne par nœud.
Inhibition racinaire	$[(\text{Moyenne témoin} - \text{moyenne dose}) / \text{moyenne témoin}] \times 100$	%	Intensité de réduction de l'enracinement par rapport au témoin.
Inhibition végétative	$[(\text{Moyenne témoin} - \text{moyenne dose}) / \text{moyenne témoin}] \times 100$	%	Intensité de réduction des jeunes pousses par rapport au témoin.

I.6. Méthodologie de l'essai 2 : effet des poudres incorporées au substrat

I.6.1. Principe expérimental

Le second essai a été conduit en pots afin d'évaluer l'effet direct de la poudre de *C. acutum* appliquée dans un substrat sableux sur la reprise végétative des fragments rhizomateux. Contrairement à l'essai en solution aqueuse, cet essai intègre un contact physique entre la poudre végétale, le sable et le rhizome. Il simule ainsi plus directement une situation d'apport de résidus végétaux dans un substrat minéral, avec libération progressive de composés solubles ou particuliers au voisinage des organes cibles (Liebman et al., 2001 ; Hatcher & Melander, 2003 ; Macías et al., 2007 ; Blum, 2011 ; Khamare et al., 2022).

I.6.2. Pots, substrat et installation

Cet essai a été conduit dans des pots perforés munis de trous de drainage, d'une hauteur d'environ 8 cm et d'une capacité approximative de 1 kg. Chaque pot a été partiellement rempli avec du sable de dune préalablement rincé abondamment à l'eau distillée. Ce rinçage avait pour but d'éliminer les poussières, les sels solubles et les impuretés minérales susceptibles d'interférer avec la réponse biologique observée. Le remplissage a été réalisé de manière homogène jusqu'à une hauteur d'environ 4,5 cm dans chaque pot.

Avant l'installation des fragments rhizomateux, le sable contenu dans les pots a été légèrement humidifié à l'eau distillée. Un fragment de rhizome comportant trois nœuds a ensuite été déposé dans chaque pot. Le fragment a été recouvert par un mélange homogène de 100 g de sable de dune et de la dose correspondante de poudre de *C. acutum*. Une fine couche supplémentaire de sable de dune d'environ 0,5 cm a été ajoutée en surface.

I.6.3. Préparation des rhizomes cibles

Des rhizomes frais de *C. dactylon* et de *P. australis* ont été récoltés puis triés afin de ne retenir que des fragments sains, visiblement intacts, d'aspect brun et comportant chacun trois nœuds. La longueur exacte des fragments variait selon l'espèce, mais les segments choisis étaient aussi homogènes que possible au sein de chaque espèce. Le critère de standardisation prioritaire était la présence de trois nœuds par fragment, considérée comme déterminante pour la capacité de reprise végétative.

Les fragments rhizomateux ont été découpés à l'aide de ciseaux préalablement désinfectés avec de l'eau de Javel à 12° chlorométriques. Ils ont ensuite subi une désinfection de surface par immersion dans une solution javellisée diluée au 1/100 (v/v) pendant 2 à 3 min. Les fragments ont ensuite été rincés abondamment à l'eau distillée, à plusieurs reprises, afin d'éliminer tout résidu de désinfectant susceptible d'altérer la reprise biologique.

I.6.4. Traitements

Dans cet essai, deux types de poudres de *C. acutum* ont été testés : la poudre foliaire et la poudre de plante entière. Chacun de ces deux types de poudre a été appliqué selon trois doses, en plus d'un témoin sans poudre végétale. Les doses sont exprimées en grammes de poudre pour 100 g de sable de dune.

Tableau 07 : Doses de poudre de *C. acutum* appliquées dans l'essai en pots.

Code	Dose	Expression	Rôle
D0	0 g	0 g / 100 g de sable	Témoin sans poudre végétale.
D1	1,75 g	1,75 g / 100 g de sable	Dose faible.
D2	2,5 g	2,5 g / 100 g de sable	Dose intermédiaire.
D3	5 g	5 g / 100 g de sable	Dose forte.

Pour chaque dose, le mélange sable-poudre a été préparé de manière homogène avant application. Le traitement témoin a reçu la même quantité de sable et a été installé selon le même schéma, mais sans poudre végétale. Trois répétitions ont été réalisées pour chaque combinaison espèce cible × type de poudre × dose. La structure complète de l'essai en pots était donc la suivante : deux espèces cibles × deux types de poudre × quatre doses × trois répétitions, soit 48 pots au total.

Tableau 08 : Structure factorielle et nombre total d'unités expérimentales de l'essai en pots.

Scénario analytique	Facteurs	Nombre total de pots
Essai en pots : deux poudres	2 espèces ; 2 poudres ; 4 doses ; 3 répétitions	48

I.6.5. Conditions d'incubation

Cet essai a été réalisé en laboratoire, à température ambiante. Après la mise en place des traitements, les pots ont été humidifiés à l'eau distillée au moyen d'un vaporisateur. Pendant toute la durée de cet essai, l'humidité du substrat a été surveillée régulièrement et maintenue à un niveau favorable à la reprise des rhizomes. L'objectif était d'éviter à la fois le dessèchement, qui pourrait limiter artificiellement l'émission des organes néoformés, et l'excès d'eau, qui pourrait favoriser l'asphyxie, la macération ou la pourriture des fragments.

Les observations finales ont été réalisées après 21 jours d'incubation. À cette échéance, les fragments ont été déterrés délicatement puis rincés soigneusement à l'eau afin d'éliminer le sable adhérent sans endommager les racines adventives et les jeunes pousses.

I.6.6. Observations et variables mesurées

Pour chaque fragment de rhizome, quatre paramètres ont été relevés : le nombre total de racines adventives émises, la longueur moyenne des racines adventives, le nombre total d'émissions végétatives et la longueur moyenne des émissions végétatives. Ces paramètres permettent de distinguer l'effet sur l'initiation des organes et l'effet sur leur croissance. Une dose peut en effet réduire le nombre d'organes émis, ralentir leur allongement, ou combiner ces deux effets.

Tableau 09 : Variables mesurées et indicateurs d'inhibition utilisés pour évaluer la reprise végétative dans l'essai en pots.

Variable	Définition	Unité	Intérêt agronomique
NR	Nombre total de racines adventives émises par fragment	Nombre	Indique la capacité d'installation racinaire après traitement.
LR	Longueur moyenne des racines adventives	cm ou mm	Indique la vigueur racinaire et l'expansion dans le substrat.
NV	Nombre total d'émissions végétatives	Nombre	Indique l'activation des bourgeons et la multiplication aérienne.
LV	Longueur moyenne des émissions végétatives	cm ou mm	Indique la vigueur de croissance des jeunes pousses.
IR	Inhibition du nombre de racines par rapport au témoin	%	Mesure de l'effet suppressif sur l'enracinement.
IV	Inhibition du nombre de pousses par rapport au témoin	%	Mesure de l'effet suppressif sur la reprise végétative.
ICR	Inhibition de la longueur racinaire	%	Mesure l'effet sur l'allongement racinaire.
ICV	Inhibition de la longueur végétative	%	Mesure l'effet sur l'allongement des pousses.

I.7. Exploitation des résultats

I.7.1. Structuration des bases de données

Les données seront organisées sous forme de tableaux longs, où chaque ligne représente une unité expérimentale. Pour le premier essai, l'unité expérimentale est le fragment de rhizome exposé à une concentration donnée de solution aqueuse. Les colonnes minimales sont : Essai, Espèce, Traitement, Concentration_g_L, Fragment, Nombre_noeuds, Nombre_émissions_racinaires et Nombre_émissions_végétatives. Pour le second essai, l'unité expérimentale est le pot contenant un fragment de rhizome. Les colonnes minimales sont : Essai, Espèce, Type_poudre, Dose_g_100g_sable, Répétition, Nombre_noeuds, NR, LR, NV et LV.

Cette structuration facilite la production de tableaux descriptifs, de graphiques, d'analyses de variance, de tests non paramétriques et d'indicateurs d'inhibition. Elle répond aux recommandations générales de l'analyse expérimentale en biologie, qui insistent sur l'identification claire de l'unité expérimentale, des facteurs fixes, des répétitions et des variables de réponse (Underwood, 1997 ; Quinn & Keough, 2002 ; Box et al., 2005 ; Zuur et al., 2009, 2010 ; Crawley, 2013 ; Gotelli & Ellison, 2013).

I.7.2. Statistiques descriptives

Pour chaque combinaison espèce-traitement, les variables seront décrites par la moyenne, l'écart-type, l'erreur standard, la médiane, les quartiles, le minimum, le maximum et le coefficient de variation. Les données de comptage seront également inspectées par histogrammes, boîtes à moustaches et diagrammes de dispersion. Les courbes concentration-réponse seront représentées pour le premier essai, tandis que les diagrammes dose-réponse par type de poudre seront privilégiés pour le second essai.

I.7.3. Indices d'inhibition et variables dérivées

Le pourcentage d'inhibition par rapport au témoin sera calculé selon la formule : $I (\%) = [(Moyenne\ témoin - Moyenne\ traitement) / Moyenne\ témoin] \times 100$. Une valeur positive indique une inhibition, une valeur proche de zéro indique une absence d'effet apparent, et une valeur négative peut traduire une stimulation ou un phénomène d'hormèse. L'interprétation de ces réponses doit rester prudente, car les effets hormétiques et les réponses non monotones sont fréquents dans les études dose-réponse des substances naturelles (Finney, 1971 ; Belz & Duke, 2014 ; Ritz et al., 2015).

I.7.4. Choix des tests statistiques

Avant toute comparaison, la distribution des résidus sera examinée par graphiques de diagnostic et, lorsque la taille d'échantillon le permet, par le test de Shapiro-Wilk. L'homogénéité des variances sera examinée par le test de Levene ou par un test robuste équivalent. Ces étapes ne doivent pas être appliquées mécaniquement, mais combinées à l'inspection visuelle, car les petits effectifs peuvent limiter la puissance des tests de normalité (Levene, 1960 ; Shapiro & Wilk, 1965 ; Sokal & Rohlf, 1995 ; Quinn & Keough, 2002 ; Zuur et al., 2010).

Pour le premier essai, lorsque les conditions paramétriques sont raisonnablement satisfaites, l'effet de la concentration sera testé par analyse de variance à un facteur séparément pour chaque espèce et chaque variable. Si les deux espèces sont analysées simultanément, un modèle à deux facteurs pourra être utilisé : $Variable = Espèce + Concentration + Espèce \times Concentration$. Lorsque les données de comptage présentent une distribution non normale, une variance croissante ou un excès de zéros, des modèles linéaires généralisés de type Poisson ou binomial négatif pourront être envisagés. A défaut, le test de Kruskal-Wallis suivi de comparaisons de Dunn constitue une alternative non paramétrique.

Pour le second essai, le modèle principal intégrera les trois facteurs expérimentaux définis dans le dispositif : espèce cible, type de poudre et dose. La formulation générale sera : $Variable = Espèce + Type_poudre + Dose + interactions$. Les comparaisons multiples post-hoc seront réalisées avec une correction adaptée, par exemple Tukey pour les modèles paramétriques ou Benjamini-Hochberg/Dunn pour les comparaisons non paramétriques (Tukey, 1949 ; Kruskal & Wallis, 1952 ; Dunn, 1964 ; Benjamini & Hochberg, 1995).

I.7.5. Représentations graphiques

Les résultats seront présentés sous forme de graphiques adaptés à la nature des données : boîtes à moustaches avec points individuels, barres de moyennes accompagnées de l'erreur standard, courbes dose-réponse, profils d'inhibition et graphiques séparés par espèce. Les figures devront indiquer clairement le témoin, les doses, le nombre de répétitions et les lettres de groupes lorsque des comparaisons post-hoc sont réalisées. Les titres des figures peuvent être placés sous les graphiques afin de respecter une présentation de type mémoire ou article.

Une attention particulière sera accordée à la séparation entre résultats, interprétation statistique et discussion biologique. Les résultats présenteront les tendances observées ; l'interprétation statistique précisera la significativité et la taille des effets ; la discussion reliera les effets observés aux mécanismes possibles : inhibition de l'émission racinaire, ralentissement de l'allongement, perturbation de l'activation des bourgeons, effet osmotique éventuel, toxicité chimique ou stimulation à faible dose (Einhellig, 1996 ; Weir et al., 2004 ; Macías et al., 2007 ; Belz & Duke, 2014 ; Duke, 2015).

Résultats et discussion

II. Résultats et discussions

II.1. Effet de l'extrait aqueux de *C. acutum* sur la reprise végétative de *C. dactylon* et *P. australis*

II.1.1. Présentation des résultats

L'essai en pots a permis d'évaluer, sur une durée de 21 jours, l'effet de différentes concentrations d'extrait aqueux de *C. acutum* sur la capacité de reprise végétative de deux espèces adventices rhizomateuses majeures des palmeraies de Ouargla : *C. dactylon* et *P. australis*. Les traitements testés sont le témoin, 25 % SM, 50 % SM, 75 % SM et 100 % SM. Les variables suivies sont les émissions racinaires, les émissions végétatives, les émissions totales, les variables standardisées par le nombre initial de nœuds et les indicateurs temporels intégrés par AUC.

Les figures 1 à 3 présentent successivement la dynamique des émissions racinaires, des émissions végétatives et des émissions totales pendant les 21 jours d'observation. Elles permettent de lire la réponse cinétique des propagules avant de résumer les valeurs finales dans les tableaux.

La figure 1 est placée ici afin de montrer spécifiquement la dynamique de rhizogenèse sous l'effet de l'extrait aqueux de *C. acutum*.

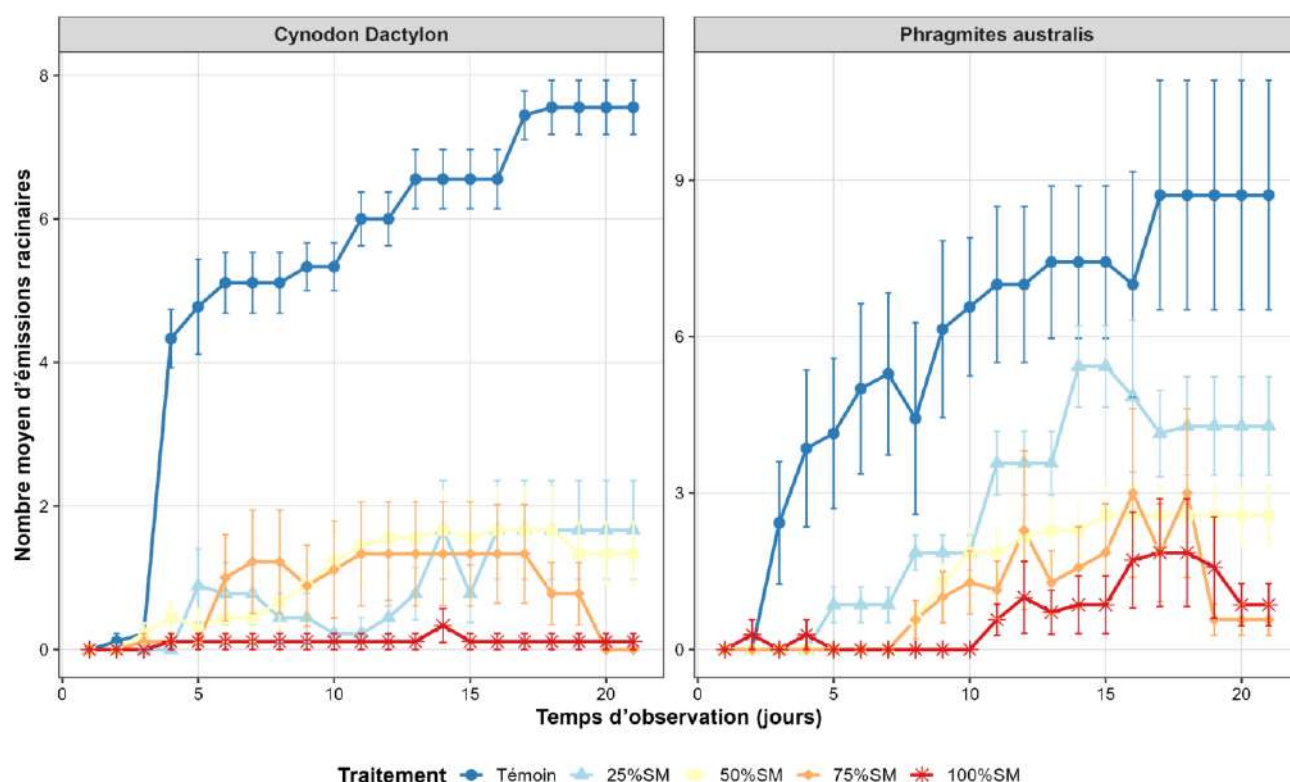


Figure 1. Évolution temporelle des émissions racinaires sous l'effet de l'extrait aqueux.

La figure 1 montre que les témoins maintiennent une émission racinaire progressive et durable, alors que les traitements à base d'extrait aqueux provoquent un ralentissement net de la rhizogenèse. La baisse devient particulièrement marquée aux fortes concentrations, ce qui traduit une perturbation précoce de la reprise racinaire des fragments végétatifs.

La figure 2 présente la dynamique des émissions végétatives, c'est-à-dire la capacité des nœuds à produire de nouvelles pousses.

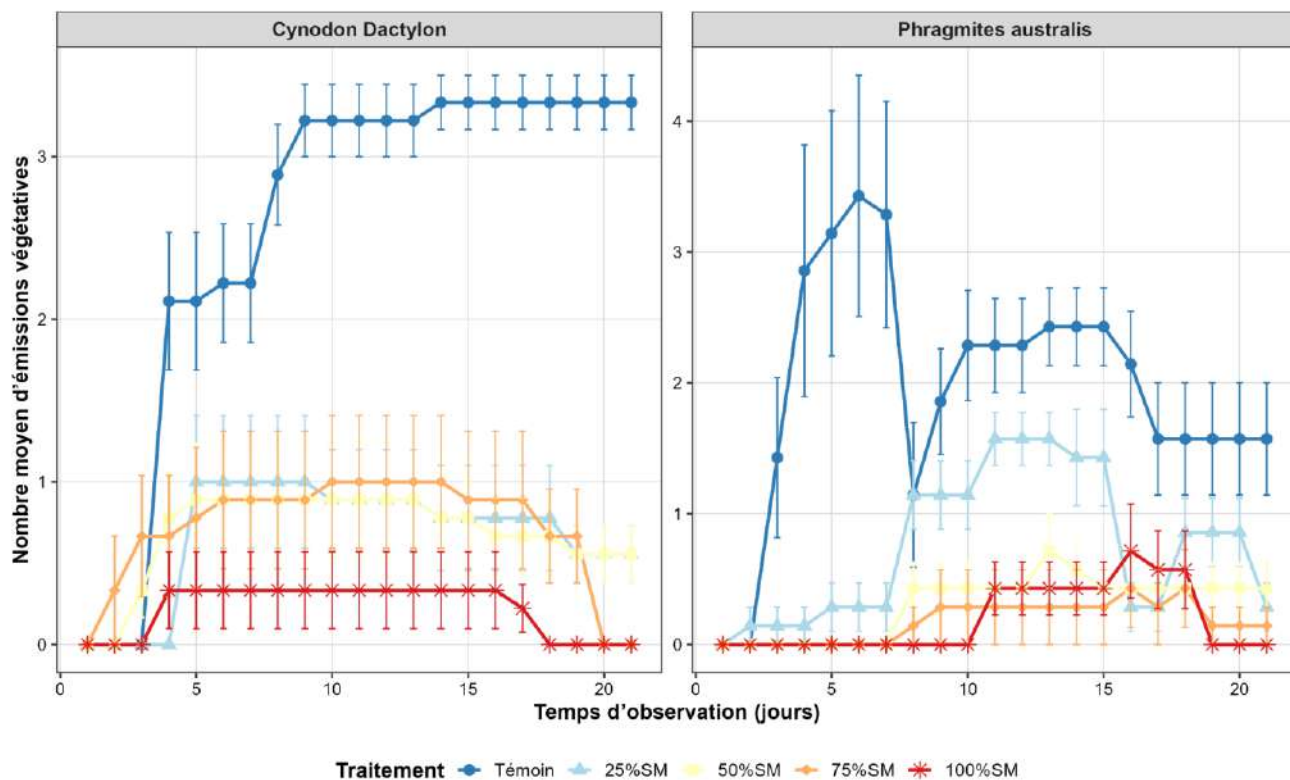


Figure 2. Évolution temporelle des émissions végétatives sous l'effet de l'extrait aqueux.

La figure 2 met en évidence une sensibilité très élevée de la néoformation végétative. Les témoins conservent une production de pousses régulière, tandis que les fortes concentrations réduisent fortement, voire annulent, les émissions végétatives. Cette réponse indique que la composante aérienne de la reprise est une cible majeure de l'effet inhibiteur.

La figure 3 regroupe les émissions racinaires et végétatives sous forme d'émissions totales, afin d'apprécier la réponse globale des propagules.

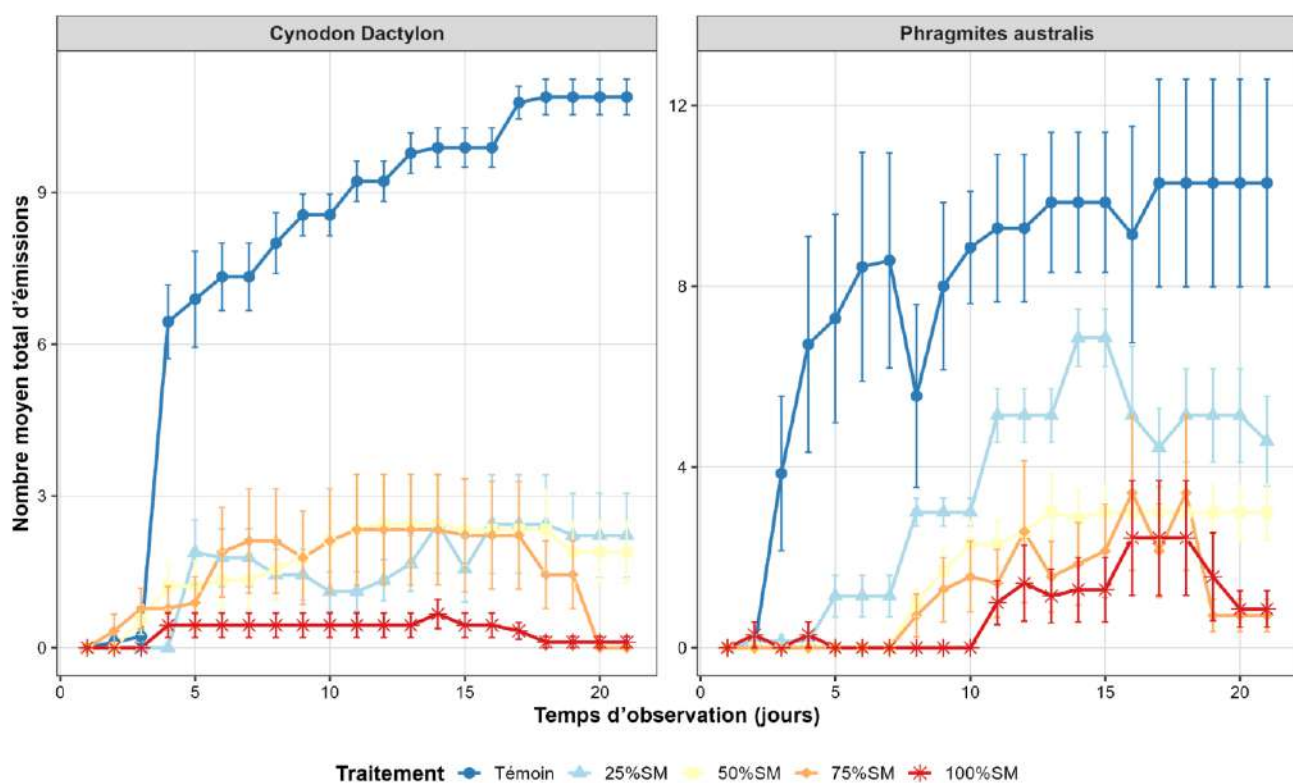


Figure 3. Évolution temporelle du nombre total d'émissions.

La figure 3 confirme que l'effet de l'extrait n'est pas limité à un seul type d'émission. La réponse totale diminue fortement avec l'augmentation de la concentration, ce qui traduit une inhibition globale de la capacité de régénération nodale. Le contraste entre témoin et fortes concentrations constitue le signal biologique principal de l'essai.

Le tableau 10 synthétise les réponses finales à J21. Il regroupe, pour chaque espèce et chaque traitement, les émissions racinaires, végétatives et totales, ainsi que l'inhibition finale calculée par rapport au témoin.

Tableau 10. Réponses finales à J21 : émissions racinaires, végétatives, totales et inhibition totale par rapport au témoin.

Espèce	Traitement	n	Racinaire	Végétative	Totale	Totale / nœud	Inhibition totale (%)
<i>C. dactylon</i>	Témoin	9	7,56 ± 0,38	3,33 ± 0,17	10,89 ± 0,35	2,72	Témoin
<i>C. dactylon</i>	25%SM	9	1,67 ± 0,69	0,56 ± 0,18	2,22 ± 0,83	0,56	79,6
<i>C. dactylon</i>	50%SM	9	1,33 ± 0,44	0,56 ± 0,18	1,89 ± 0,61	0,47	82,7
<i>C. dactylon</i>	75%SM	9	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,00	100,0
<i>C. dactylon</i>	100%SM	9	0,11 ± 0,11	0,00 ± 0,00	0,11 ± 0,11	0,03	99,0

Espèce	Traitement	n	Racinaire	Végétative	Totale	Totale / nœud	Inhibition totale (%)
<i>P. australis</i>	Témoin	7	8,71 ± 2,20	1,57 ± 0,43	10,29 ± 2,30	2,76	Témoin
<i>P. australis</i>	25%SM	7	4,29 ± 0,94	0,29 ± 0,18	4,57 ± 1,00	1,18	55,6
<i>P. australis</i>	50%SM	7	2,57 ± 0,57	0,43 ± 0,20	3,00 ± 0,62	0,77	70,8
<i>P. australis</i>	75%SM	7	0,57 ± 0,30	0,14 ± 0,14	0,71 ± 0,36	0,18	93,1
<i>P. australis</i>	100%SM	7	0,86 ± 0,40	0,00 ± 0,00	0,86 ± 0,40	0,21	91,7

Le tableau 10 montre d'abord la forte vigueur des témoins : *C. dactylon* atteint 10,89 émissions totales par propagule et *P. australis* 10,29. Chez *C. dactylon*, l'inhibition totale atteint 79,6 % à 25 % SM, 82,7 % à 50 % SM, 100 % à 75 % SM et 99,0 % à 100 % SM. Chez *P. australis*, l'inhibition est plus progressive, avec 55,6 % à 25 % SM, 70,8 % à 50 % SM, 93,1 % à 75 % SM et 91,7 % à 100 % SM. Ces valeurs indiquent que *C. dactylon* est plus rapidement bloqué, alors que *P. australis* conserve une réponse racinaire résiduelle aux faibles et moyennes concentrations.

La figure 4 complète le tableau 2 en représentant visuellement l'intensité de l'inhibition finale par rapport au témoin.

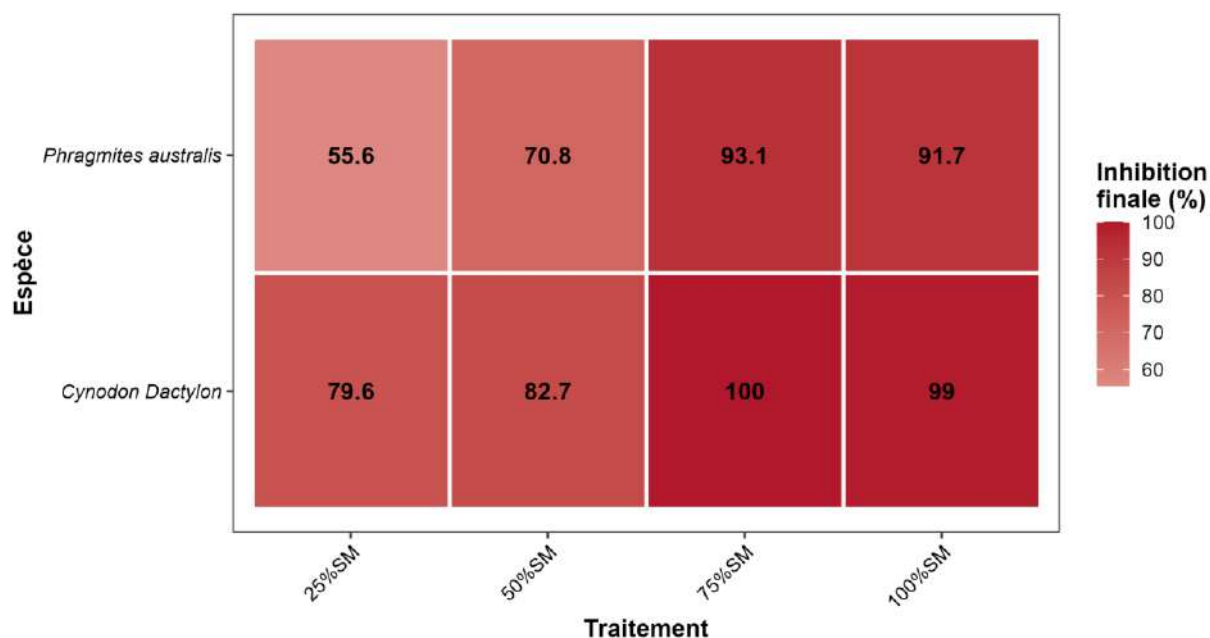


Figure 4. Heatmap de l'inhibition totale finale par rapport au témoin.

La figure 4 permet d'identifier immédiatement les traitements les plus suppressifs. Les niveaux d'inhibition les plus élevés se concentrent aux doses 75 % SM et 100 % SM, avec une réponse particulièrement

sévère chez *C. dactylon*. Cette représentation confirme le caractère fortement dose-dépendant de l'effet allélopathique final.

La figure 5 distingue les types biologiques de réponse observés à J21 : absence d'émission, réponse racinaire seule, réponse végétative seule ou réponse mixte.

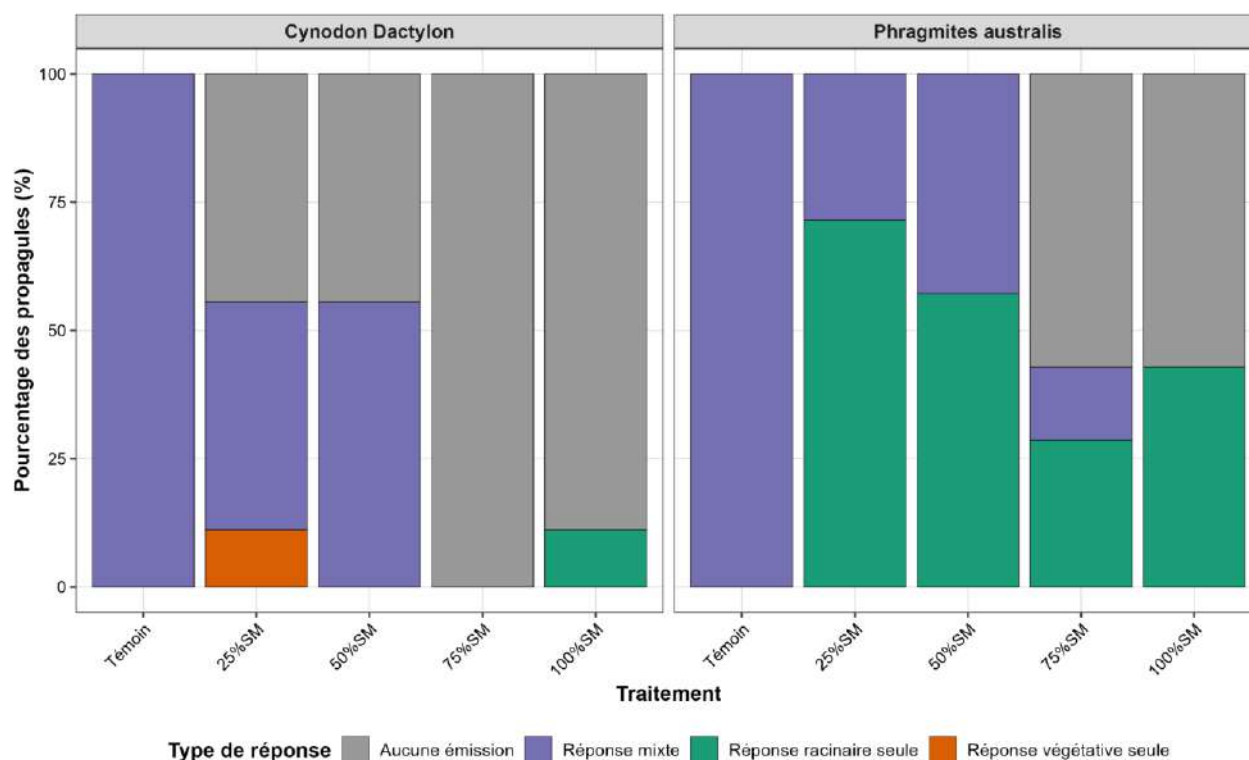


Figure 5. Répartition des types biologiques de réponse au dernier jour d'observation.

La figure 5 montre que les traitements concentrés augmentent fortement la fréquence des propagules sans émission. À l'inverse, les témoins se caractérisent par des réponses mixtes, associant racines et pousses. Cette lecture confirme que l'extrait agit sur la qualité biologique de la reprise, et non seulement sur le nombre moyen d'émissions.

II.1.2. Interprétation

Les résultats indiquent que l'extrait aqueux de *C. acutum* possède une activité fortement inhibitrice sur la reprise végétative des deux espèces étudiées. L'effet est visible sur trois dimensions biologiques complémentaires : la rhizogenèse, la néoformation végétative et la réponse totale de la propagule. Cette triple réponse est essentielle dans le cas des espèces rhizomateuses, car leur nuisibilité agronomique repose précisément sur leur capacité à produire simultanément de nouvelles racines d'ancrage et de nouvelles pousses aériennes à partir de fragments de rhizomes ou de stolons.

Chez *C. dactylon*, l'effet est particulièrement marqué. Les concentrations 75 % SM et 100 % SM entraînent une inhibition quasi totale des émissions. Ce résultat suggère que l'extrait aqueux affecte non seulement le déclenchement de la rhizogenèse, mais aussi la capacité des bourgeons nodaux à assurer une reprise végétative fonctionnelle. Le fait que l'inhibition atteigne 100 % à 75 % SM puis reste presque totale à 100 % SM traduit

un effet seuil : au-delà d'une certaine charge allélopathique, les tissus méristématiques ou les zones de différenciation deviennent incapables de maintenir les processus cellulaires nécessaires à l'émission.

Chez *P. australis*, l'inhibition est également importante mais plus graduelle. La plante conserve une certaine capacité de réponse racinaire sous 25 % SM et 50 % SM, alors que les émissions végétatives sont fortement réduites. Cette dissociation entre réponse racinaire et réponse végétative indique que les deux composantes de la reprise n'ont pas la même sensibilité. La rhizogenèse semble plus résistante que la néoformation végétative chez *P. australis*, probablement en raison de la vigueur intrinsèque des rhizomes, de leurs réserves carbonées et minérales, et de la capacité des tissus rhizomateux à mobiliser des ressources internes avant l'établissement complet de nouvelles structures aériennes.

La comparaison des deux espèces suggère que *C. dactylon* est plus rapidement bloqué par les fortes concentrations, tandis que *P. australis* garde une réponse racinaire résiduelle même à forte concentration. Cependant, l'effet général de l'extrait demeure très net chez les deux espèces. Ainsi, *C. dactylon* répond par un effondrement rapide et presque total de toutes les émissions à forte concentration ; *P. australis* manifeste plutôt une réduction progressive, avec maintien partiel de la rhizogenèse mais effondrement très net de la composante végétative.

La réponse totale et l'AUC constituent les deux indicateurs les plus synthétiques de l'essai. La réponse totale finale renseigne sur l'état biologique au terme de l'essai, tandis que l'AUC décrit la pression cumulée exercée par le traitement durant toute la période expérimentale. Dans cette étude, les deux approches convergent : les traitements réduisent fortement les émissions finales et les trajectoires temporelles cumulées. Cette convergence renforce la robustesse de l'interprétation biologique.

Analyse intégrée de la dynamique temporelle par AUC

Définition et intérêt biologique. L'AUC (Area Under the Curve, ou aire sous la courbe) représente l'intégration de la réponse biologique sur l'ensemble de la période d'observation, de J01 à J21. Contrairement à la valeur finale, qui décrit uniquement l'état de la propagule au terme de l'essai, l'AUC renseigne sur la trajectoire complète de reprise, c'est-à-dire sur l'intensité cumulée des émissions racinaires, végétatives et totales. Elle est donc particulièrement pertinente pour les essais allélopathiques, car un traitement peut agir en retardant la reprise, en réduisant sa vitesse, ou en bloquant durablement l'expression des bourgeons nodaux.

Les résultats AUC confirment que l'extrait aqueux de *C. acutum* ne réduit pas seulement les émissions finales à J21 : il diminue toute la dynamique temporelle de régénération. Chez *C. dactylon*, le témoin présente les valeurs AUC les plus élevées, traduisant une reprise continue et synchronisée. Les concentrations 25 % et 50 % SM provoquent une forte réduction de l'aire cumulée, tandis que 75 % SM et 100 % SM entraînent un effondrement quasi complet de la réponse intégrée. Cette lecture est cohérente avec une inhibition précoce et durable de l'activité méristématique nodale.

Spécificité de *P. australis*. Chez *P. australis*, l'AUC met en évidence une inhibition également très nette, mais plus progressive. La composante racinaire conserve une activité résiduelle aux faibles et moyennes concentrations, alors que l'AUC végétative chute fortement. Cette dissociation suggère que les rhizomes de *P. australis* maintiennent une certaine capacité d'ancrage ou de survie, probablement liée aux réserves internes, mais que la production de nouvelles pousses devient rapidement limitée sous contrainte allélopathique.

Les tests de Kruskal-Wallis appliqués aux variables AUC confirment un effet traitement très hautement significatif chez les deux espèces. Pour *C. dactylon*, l'AUC racinaire, l'AUC végétative et l'AUC totale sont toutes fortement affectées, avec des p-values inférieures à 0,001. Pour *P. australis*, le même niveau de significativité est observé, notamment pour l'AUC totale et l'AUC totale standardisée par nœud. Ainsi, l'effet de l'extrait est statistiquement validé non seulement sur le résultat final, mais aussi sur l'ensemble de la cinétique de reprise.

L'intégration de l'AUC renforce la solidité de l'interprétation, car elle évite de limiter la conclusion à un seul temps d'observation. Dans le cadre d'une thèse, les AUC doivent être considérées comme des indicateurs synthétiques majeurs de la réponse allélopathique : elles permettent de distinguer une simple inhibition tardive d'un blocage précoce, durable et cumulatif de la multiplication végétative.

Le tableau 11 présente les indicateurs AUC, qui intègrent la réponse racinaire, végétative et totale sur toute la durée de l'essai.

Tableau 11. Réponse temporelle globale : AUC racinaire, végétative et totale.

Espèce	Traitement	AUC racinaire	AUC végétative	AUC totale
<i>C. Dactylon</i>	100%SM	2,17 ± 1,82	4,56 ± 3,20	6,72 ± 3,33
<i>C. Dactylon</i>	25%SM	16,61 ± 6,14	13,83 ± 5,13	30,44 ± 10,16
<i>C. Dactylon</i>	50%SM	20,78 ± 6,87	14,06 ± 5,07	34,83 ± 11,37
<i>C. Dactylon</i>	75%SM	16,67 ± 8,95	15,00 ± 6,73	31,67 ± 14,81
<i>C. Dactylon</i>	Témoin	107,56 ± 5,28	52,67 ± 3,29	160,22 ± 6,19
<i>P. australis</i>	100%SM	12,86 ± 7,04	4,00 ± 1,91	16,86 ± 8,74
<i>P. australis</i>	25%SM	53,71 ± 4,38	15,57 ± 1,65	69,29 ± 5,36
<i>P. australis</i>	50%SM	29,00 ± 6,16	6,21 ± 2,71	35,21 ± 7,32
<i>P. australis</i>	75%SM	20,29 ± 10,22	3,64 ± 3,17	23,93 ± 11,52
<i>P. australis</i>	Témoin	120,36 ± 27,19	40,50 ± 6,75	160,86 ± 32,33

Le tableau 11 montre que les AUC des témoins sont les plus élevées chez les deux espèces, avec une AUC totale de 160,22 chez *C. dactylon* et de 160,86 chez *P. australis*. Sous extrait, les AUC totales diminuent fortement : chez *C. dactylon*, elles chutent jusqu'à 6,72 à 100 % SM ; chez *P. australis*, elles descendent à 16,86 à 100 % SM et 23,93 à 75 % SM. Cette baisse confirme que l'extrait réduit non seulement l'état final à J21, mais aussi toute la trajectoire cumulative de reprise.

La figure 6 compare les traitements sur l'AUC totale chez *C. dactylon*.

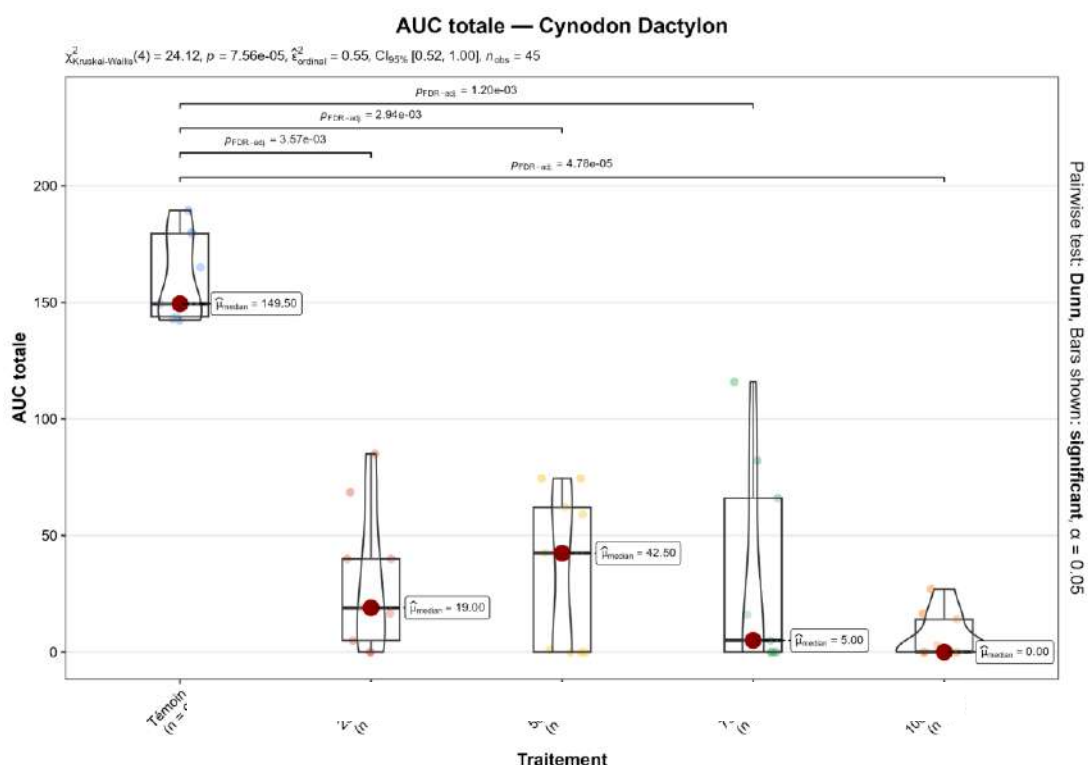


Figure 6. Comparaison des traitements sur l'AUC totale chez *C. dactylon*.

La figure 6 confirme un effondrement de la réponse temporelle intégrée chez *C. dactylon* sous extrait aqueux. Les traitements s'écartent fortement du témoin, ce qui indique que l'inhibition est cumulative et durable sur l'ensemble des 21 jours.

La figure 7 présente l'AUC totale standardisée par nœud chez *C. dactylon*.

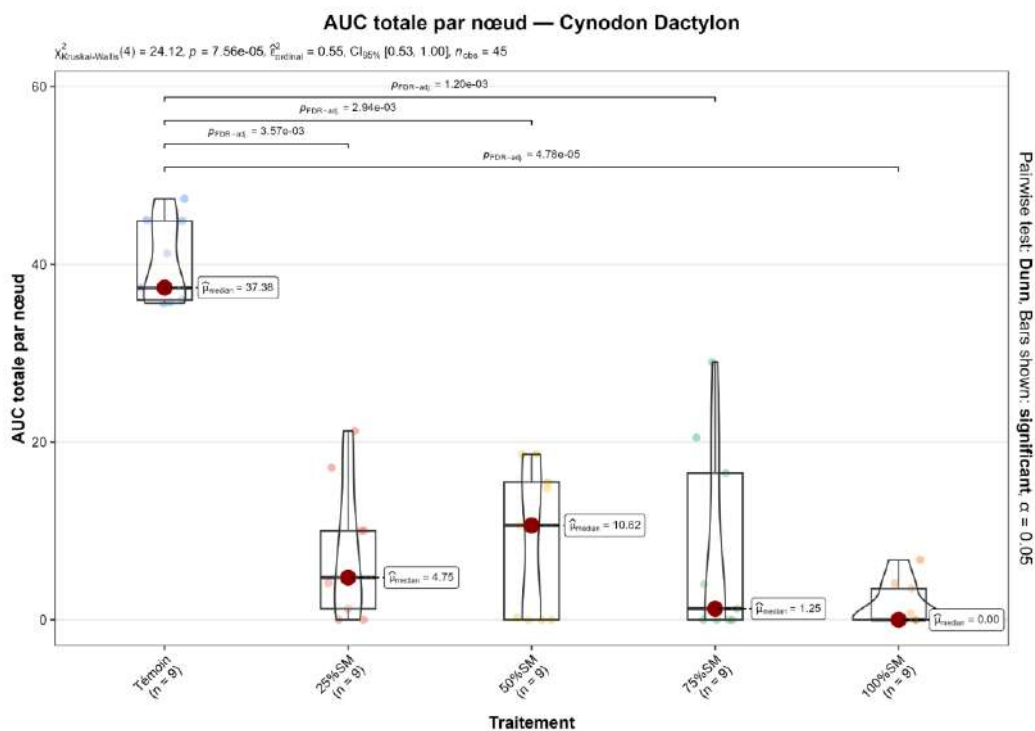


Figure 7. Comparaison des traitements sur l'AUC totale standardisée par nœud chez *C. dactylon*.

La figure 7 montre que l'effet inhibiteur persiste après correction par le nombre initial de nœuds. Ainsi, la baisse observée ne résulte pas simplement d'une différence morphologique initiale entre propagules, mais bien d'une réduction de la capacité d'émission par unité nodale.

La figure 8 compare les traitements sur l'AUC totale chez *P. australis*.

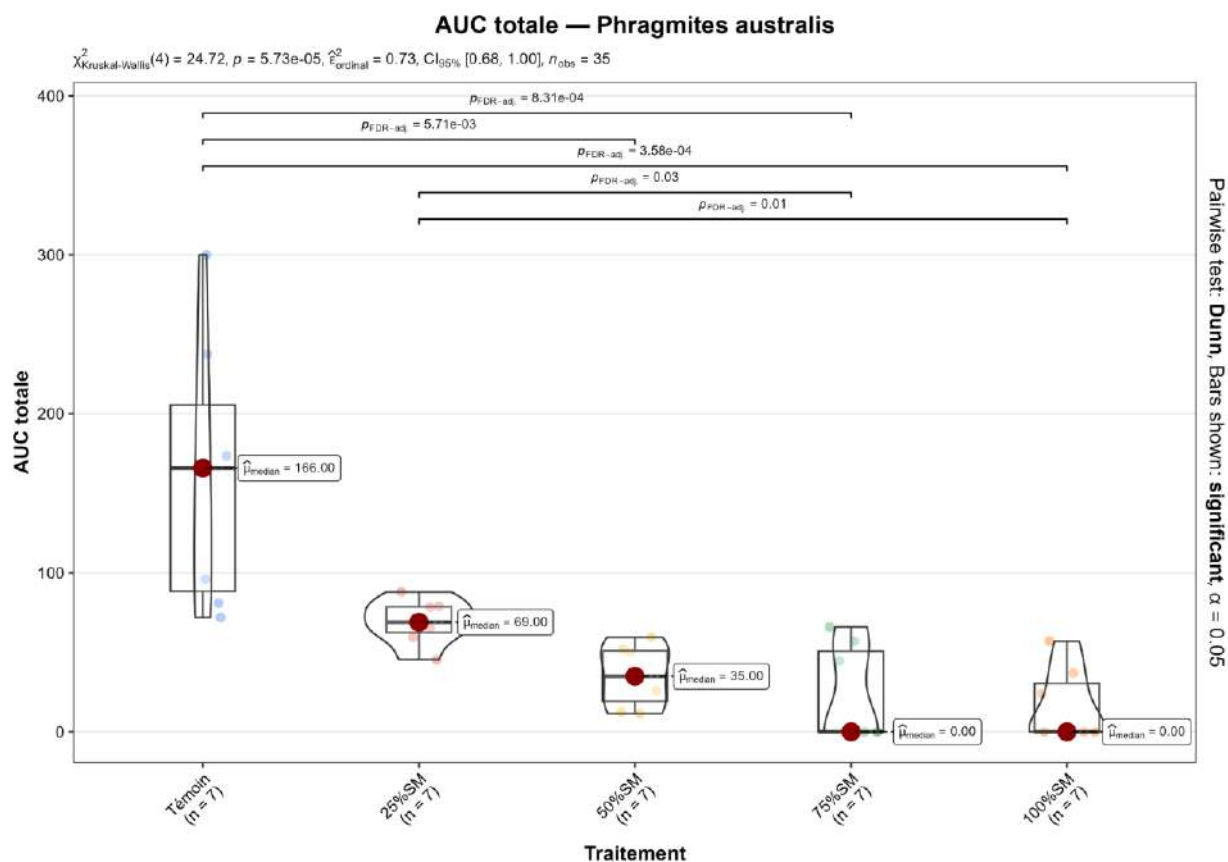


Figure 8. Comparaison des traitements sur l'AUC totale chez *P. australis*.

La figure 8 met en évidence une réduction nette de la réponse cumulée chez *P. australis*. La diminution est cependant plus graduelle que chez *C. dactylon*, ce qui traduit une capacité de maintien partiel de la rhizogenèse aux concentrations faibles ou intermédiaires.

La figure 9 présente l'AUC totale standardisée par nœud chez *P. australis*.

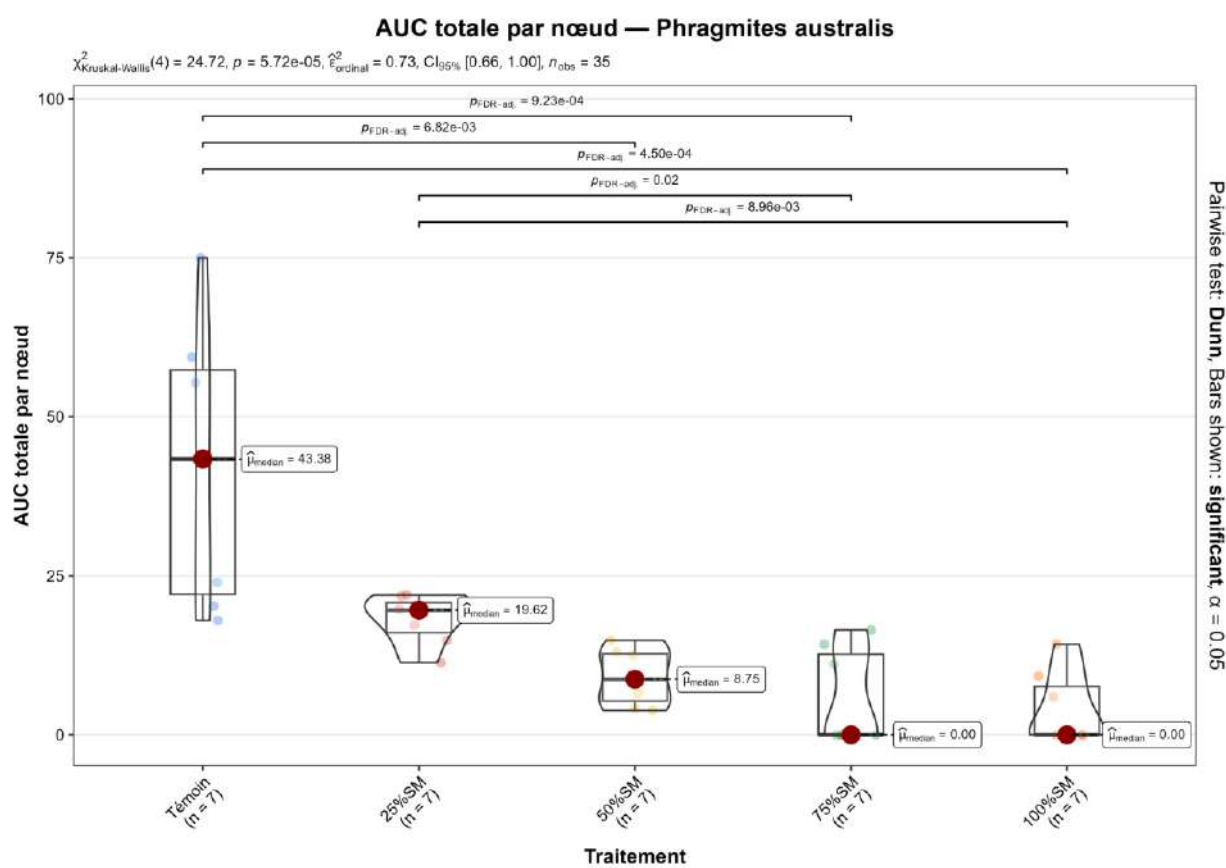


Figure 9. Comparaison des traitements sur l'AUC totale standardisée par nœud chez *P. australis*.

La figure 9 confirme que la réduction de la réponse intégrée de *P. australis* reste visible après standardisation par nœud. L'effet allélopathique touche donc directement le potentiel fonctionnel des nœuds, même lorsque la variabilité initiale des fragments est prise en compte.

L'approche AUC confirme que l'extrait aqueux de *C. acutum* exerce une pression allélopathique cumulative, intense et statistiquement robuste. La réduction simultanée de l'AUC totale et de l'AUC totale par nœud montre que l'effet ne dépend pas uniquement du nombre initial de nœuds, mais traduit une altération effective de la capacité de régénération nodale. Les figures AUC doivent donc être conservées dans le corps de la thèse, tandis que les AUC racinaires et végétatives détaillées peuvent, si nécessaire, être placées en annexe.

II.1.3. Validation par les résultats statistiques

Le tableau 12 présente la validation statistique des réponses finales à J21 par le test non paramétrique de Kruskal-Wallis.

Tableau 12. Validation statistique des réponses finales à J21 par le test de Kruskal-Wallis

Espèce	Variable	χ^2	ddl	p	Signif.	Interprétation
<i>C. dactylon</i>	Émissions racinaires	30,97	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. dactylon</i>	Émissions racinaires / nœud	30,97	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. dactylon</i>	Émissions totales	31,37	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. dactylon</i>	Émissions totales / nœud	31,37	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. dactylon</i>	Émissions végétatives	33,19	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. dactylon</i>	Émissions végétatives / nœud	33,19	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Émissions racinaires	20,09	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Émissions racinaires / nœud	20,32	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Émissions totales	22,52	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Émissions totales / nœud	22,85	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Émissions végétatives	18,81	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Émissions végétatives / nœud	19,65	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif

Le tableau 12 confirme que toutes les variables finales sont affectées de manière très hautement significative par le traitement chez les deux espèces. Chez *C. dactylon*, les valeurs de χ^2 sont particulièrement élevées pour les émissions végétatives, totales et racinaires, ce qui valide l'intensité de l'inhibition observée. Chez *P. australis*, les effets restent également très significatifs, démontrant que la réponse plus graduelle demeure statistiquement robuste.

Les figures 10 et 11 illustrent les comparaisons statistiques des émissions totales finales pour chacune des deux espèces.

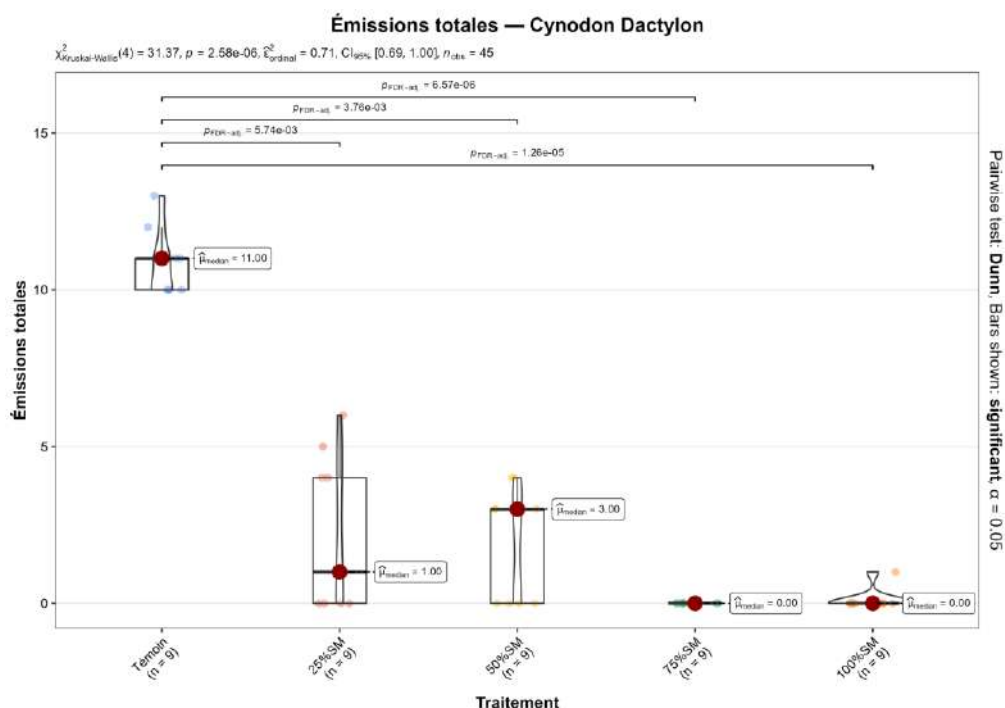


Figure 10. Comparaison statistique des émissions totales à J21 chez *C. dactylon*.

La figure 10 montre que les émissions totales de *C. dactylon* sont nettement supérieures dans le témoin et fortement réduites par les traitements. Les comparaisons post-hoc indiquent que les concentrations traitées, en particulier 75 % SM et 100 % SM, se distinguent fortement du témoin.

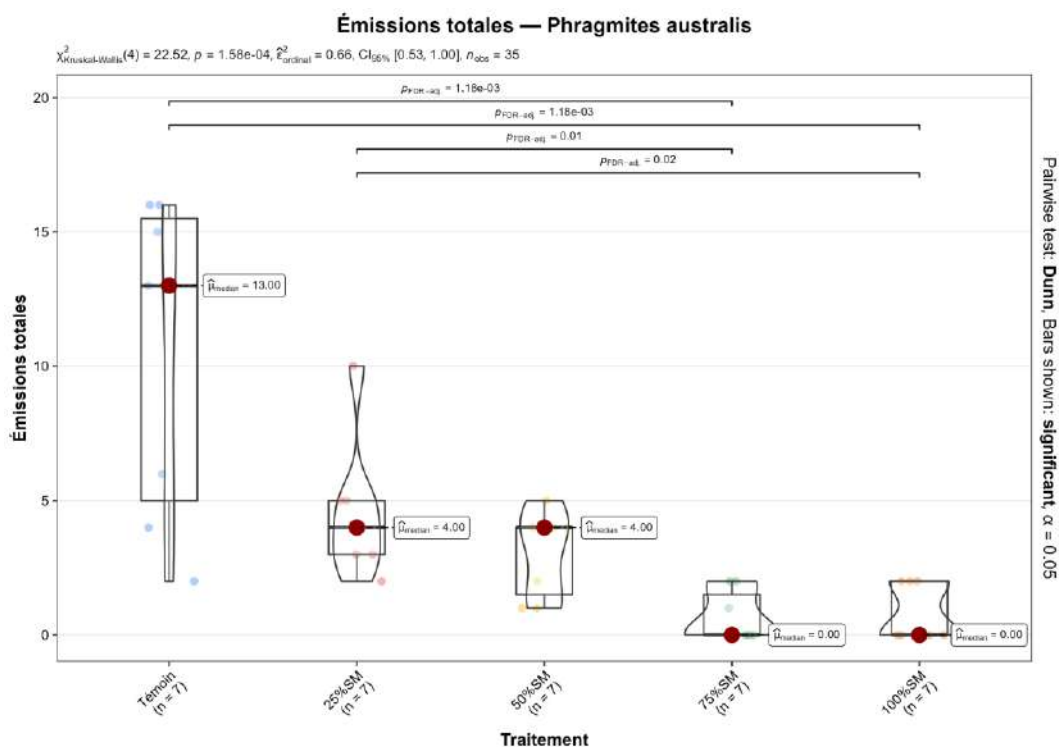


Figure 11. Comparaison statistique des émissions totales à J21 chez *P. australis*.

La figure 11 montre le même schéma général chez *P. australis*, avec un témoin plus productif et une réduction importante sous traitement. La séparation statistique est particulièrement nette pour les concentrations élevées, ce qui confirme l'effet suppressif de l'extrait sur la reprise totale.

Le tableau 13 vérifie si l'effet traitement reste significatif lorsque la réponse est intégrée sur toute la période expérimentale par AUC.

Tableau 13. Validation statistique des réponses temporelles intégrées par AUC.

Espèce	Variable	χ^2	ddl	p	Signif.	Interprétation
<i>C. Dactylon</i>	AUC racinaire	25,82	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	AUC racinaire / nœud	25,82	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	AUC totale	24,12	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	AUC totale / nœud	24,12	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	AUC végétative	22,48	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	AUC végétative / nœud	22,48	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	AUC racinaire	21,40	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	AUC racinaire / nœud	21,67	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	AUC totale	24,72	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif

Espèce	Variable	χ^2	ddl	p	Signif.	Interprétation
<i>P. australis</i>	AUC totale / nœud	24,72	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	AUC végétative	23,49	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	AUC végétative / nœud	23,73	4	< 0,001	***	Effet traitement très hautement significatif

Le tableau 12 montre que les variables AUC sont toutes très hautement significatives. Cette validation est essentielle, car elle démontre que l'effet de l'extrait n'est pas seulement visible au dernier jour, mais qu'il structure l'ensemble de la cinétique de reprise. Les AUC totales et les AUC standardisées par nœud confirment la robustesse biologique et statistique de l'inhibition.

Les tableaux 13a et 13b détaillent les comparaisons post-hoc de Dunn entre chaque concentration et le témoin, respectivement pour les variables finales à J21 et les variables intégrées par AUC.

Tableau 13a. Comparaisons post-hoc de Dunn entre chaque concentration et le témoin pour les variables finales à J21.

Type	Espèce	Variable	Traitement comparé	Z	p ajusté BH	Signif.
J21	<i>C. Dactylon</i>	Émissions racinaires	25%SM	-3,31	0,003	**
J21	<i>C. Dactylon</i>	Émissions racinaires	50%SM	-3,26	0,003	**
J21	<i>C. Dactylon</i>	Émissions racinaires	75%SM	-4,95	< 0,001	***
J21	<i>C. Dactylon</i>	Émissions racinaires	100%SM	-4,68	< 0,001	***
J21	<i>C. Dactylon</i>	Émissions totales	25%SM	-3,05	0,006	**
J21	<i>C. Dactylon</i>	Émissions totales	50%SM	-3,26	0,004	**
J21	<i>C. Dactylon</i>	Émissions totales	75%SM	-4,97	< 0,001	***
J21	<i>C. Dactylon</i>	Émissions totales	100%SM	-4,71	< 0,001	***
J21	<i>C. Dactylon</i>	Émissions végétatives	25%SM	-3,17	0,004	**
J21	<i>C. Dactylon</i>	Émissions végétatives	50%SM	-3,17	0,004	**
J21	<i>C. Dactylon</i>	Émissions végétatives	75%SM	-4,99	< 0,001	***

Type	Espèce	Variable	Traitement comparé	Z	p ajusté BH	Signif.
J21	<i>C. Dactylon</i>	Émissions végétatives	100%SM	-4,99	< 0,001	***
J21	<i>P. australis</i>	Émissions racinaires	25%SM	-0,69	0,547	ns
J21	<i>P. australis</i>	Émissions racinaires	50%SM	-1,64	0,145	ns
J21	<i>P. australis</i>	Émissions racinaires	75%SM	-3,60	0,003	**
J21	<i>P. australis</i>	Émissions racinaires	100%SM	-3,31	0,005	**
J21	<i>P. australis</i>	Émissions totales	25%SM	-0,95	0,426	ns
J21	<i>P. australis</i>	Émissions totales	50%SM	-1,80	0,103	ns
J21	<i>P. australis</i>	Émissions totales	75%SM	-3,82	0,001	**
J21	<i>P. australis</i>	Émissions totales	100%SM	-3,68	0,001	**
J21	<i>P. australis</i>	Émissions végétatives	25%SM	-2,93	0,011	*
J21	<i>P. australis</i>	Émissions végétatives	50%SM	-2,43	0,038	*
J21	<i>P. australis</i>	Émissions végétatives	75%SM	-3,44	0,003	**
J21	<i>P. australis</i>	Émissions végétatives	100%SM	-3,95	< 0,001	***

Le tableau 13a montre que, chez *C. dactylon*, toutes les concentrations réduisent significativement les émissions racinaires, végétatives et totales par rapport au témoin. Chez *P. australis*, les faibles concentrations restent parfois non significatives pour les émissions racinaires et totales, alors que 75 % SM et 100 % SM se distinguent clairement du témoin. Cette différence confirme une sensibilité plus rapide de *C. dactylon* et une réponse plus progressive chez *P. australis*.

Tableau 13b. Comparaisons post-hoc de Dunn entre chaque concentration et le témoin pour les variables intégrées par AUC.

Type	Espèce	Variable	Traitement comparé	Z	p ajusté BH	Signif.
AUC	<i>C. Dactylon</i>	AUC racinaire	25%SM	-3,32	0,003	**
AUC	<i>C. Dactylon</i>	AUC racinaire	50%SM	-3,29	0,003	**
AUC	<i>C. Dactylon</i>	AUC racinaire	75%SM	-3,91	< 0,001	***
AUC	<i>C. Dactylon</i>	AUC racinaire	100%SM	-4,71	< 0,001	***
AUC	<i>C. Dactylon</i>	AUC totale	25%SM	-3,19	0,004	**
AUC	<i>C. Dactylon</i>	AUC totale	50%SM	-3,33	0,003	**
AUC	<i>C. Dactylon</i>	AUC totale	75%SM	-3,67	0,001	**
AUC	<i>C. Dactylon</i>	AUC totale	100%SM	-4,57	< 0,001	***
AUC	<i>C. Dactylon</i>	AUC végétative	25%SM	-3,25	0,004	**
AUC	<i>C. Dactylon</i>	AUC végétative	50%SM	-2,95	0,008	**
AUC	<i>C. Dactylon</i>	AUC végétative	75%SM	-3,32	0,004	**

Type	Espèce	Variable	Traitement comparé	Z	p ajusté BH	Signif.
AUC	<i>C. Dactylon</i>	AUC végétative	100%SM	-4,50	< 0,001	***
AUC	<i>P. australis</i>	AUC racinaire	25%SM	-0,97	0,414	ns
AUC	<i>P. australis</i>	AUC racinaire	50%SM	-2,78	0,014	*
AUC	<i>P. australis</i>	AUC racinaire	75%SM	-3,40	0,003	**
AUC	<i>P. australis</i>	AUC racinaire	100%SM	-3,81	0,001	**
AUC	<i>P. australis</i>	AUC totale	25%SM	-1,30	0,277	ns
AUC	<i>P. australis</i>	AUC totale	50%SM	-3,14	0,006	**
AUC	<i>P. australis</i>	AUC totale	75%SM	-3,77	< 0,001	***
AUC	<i>P. australis</i>	AUC totale	100%SM	-4,13	< 0,001	***
AUC	<i>P. australis</i>	AUC végétative	25%SM	-1,72	0,137	ns
AUC	<i>P. australis</i>	AUC végétative	50%SM	-3,38	0,002	**
AUC	<i>P. australis</i>	AUC végétative	75%SM	-3,95	< 0,001	***
AUC	<i>P. australis</i>	AUC végétative	100%SM	-3,93	< 0,001	***

Le tableau 13b confirme la même tendance pour les AUC. Chez *C. dactylon*, l'ensemble des concentrations entraîne une baisse significative des AUC. Chez *P. australis*, l'AUC racinaire à 25 % SM reste non significative, mais les concentrations 50 %, 75 % et 100 % SM deviennent significatives, surtout pour l'AUC totale et l'AUC végétative. Les comparaisons post-hoc valident donc le caractère dose-dépendant et cumulatif de l'effet allélopathique.

Les figures 12 et 13 examinent la relation entre émissions racinaires et émissions végétatives au dernier jour d'observation.

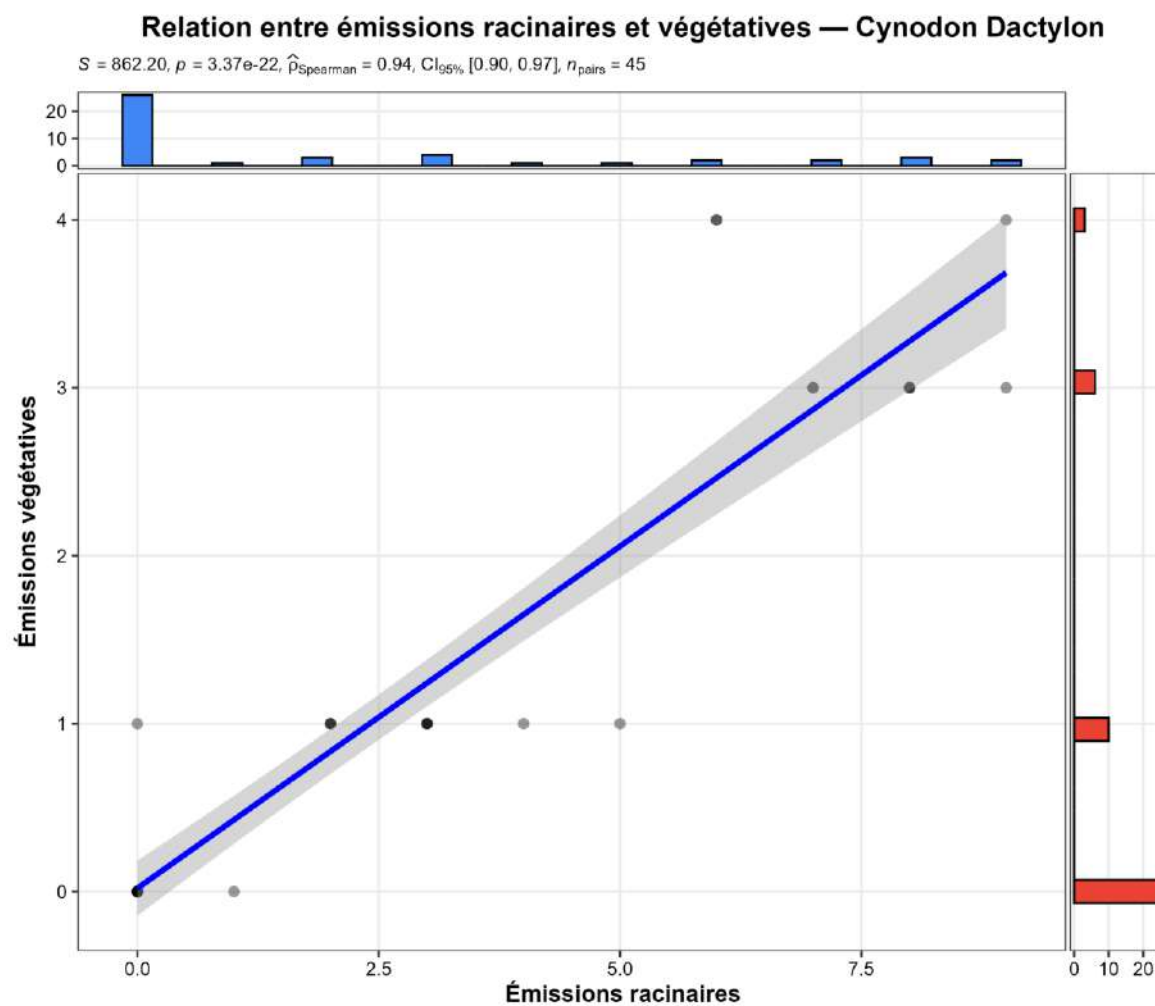


Figure 12. Relation entre émissions racinaires et végétatives chez *C. Dactylon* au dernier jour.

La figure 12 montre une association très forte entre rhizogenèse et néoformation végétative chez *C. dactylon*. Les propagules capables d'émettre des racines sont généralement ceux qui produisent aussi des pousses, ce qui indique une reprise coordonnée des deux fonctions de régénération.

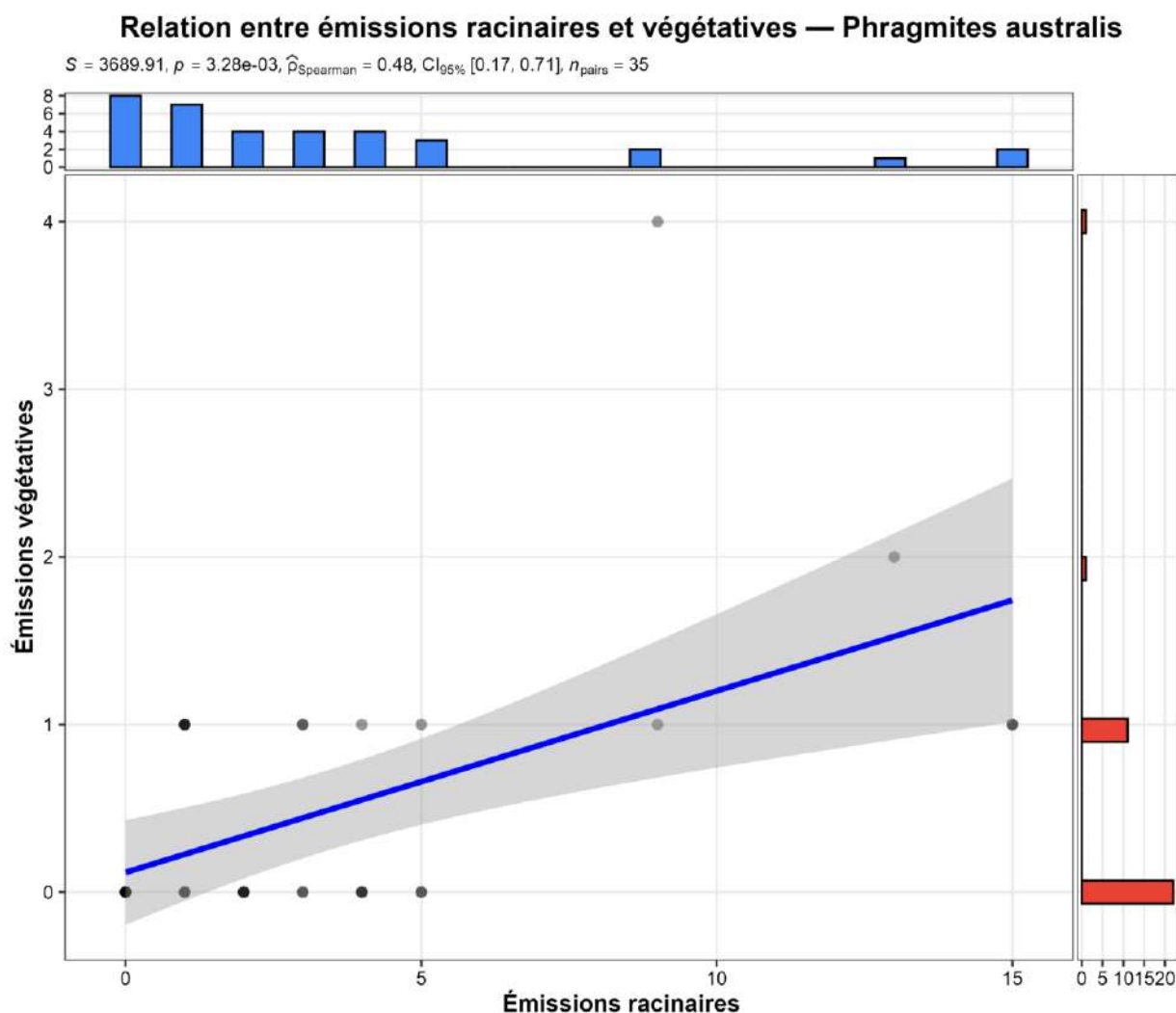


Figure 13. Relation entre émissions racinaires et végétatives chez *P. australis* au dernier jour.

La figure 13 montre une relation plus modérée chez *P. australis*. Cette réponse suggère une dissociation partielle entre émission racinaire et émission végétative : certains fragments conservent une capacité d’ancrage racinaire sans produire proportionnellement de nouvelles pousses.

II.1.4. Discussion partielle

Les résultats obtenus s’inscrivent clairement dans le cadre des interactions allélopathiques médiées par des métabolites secondaires hydrosolubles. L’utilisation d’un extrait aqueux est pertinente, car elle simule partiellement la libération de composés par lessivage des tissus végétaux, processus reconnu comme l’une des voies majeures d’entrée des allélocomposés dans l’environnement édaphique (Rice, 1984 ; Putnam et Tang, 1986 ; Reigosa et al., 2006 ; Cheema et al., 2013). Les tissus végétaux peuvent libérer par lixiviation des composés phénoliques, flavonoïdes, alcaloïdes, terpènes, glycosides ou acides organiques capables d’inhiber la germination, la croissance racinaire, l’élargissement des plantules ou la reprise végétative (Einhellig, 1995 ; Inderjit et Duke, 2003 ; Weir et al., 2004 ; Li et al., 2010).

La forte inhibition observée chez *C. Dactylon* est agronomiquement importante. Cette Poaceae vivace, stolonifère et rhizomateuse, est connue pour sa grande plasticité écologique, sa tolérance aux stress et sa capacité de recolonisation rapide des milieux cultivés. Dans les palmeraies sahariennes, elle constitue souvent une adventice très compétitive, capable d’exploiter l’eau d’irrigation, les inter-rangs et les zones enrichies en matière

organique. Le fait qu'un extrait aqueux provoque jusqu'à 100 % d'inhibition à 75 % SM montre que les tissus nodaux de cette espèce peuvent être très sensibles aux métabolites hydrosolubles de *C. acutum*.

Cette observation rejoint les travaux montrant que les racines et les tissus méristématiques sont généralement plus sensibles aux allélocomposés que les organes déjà différenciés, car ils dépendent fortement de la mitose, de l'élongation cellulaire, du fonctionnement membranaire, de l'équilibre hormonal et de l'activité respiratoire (Blum, 1996 ; Einhellig, 1995 ; Gniazdowska et Bogatek, 2005 ; Soltys et al., 2013). Les composés phénoliques peuvent altérer la perméabilité membranaire, modifier les flux ioniques, perturber les pompes H⁺-ATPases, provoquer un stress oxydatif et réduire l'activité enzymatique associée à la croissance (Weir et al., 2004 ; Li et al., 2010).

Chez *P. australis*, la réponse observée est plus nuancée. L'espèce conserve une activité racinaire notable aux faibles concentrations, notamment à 25 % et 50 % SM, tout en montrant une forte inhibition végétative. Cette dissociation peut être interprétée comme une stratégie de survie clonale. Les rhizomes de *P. australis* sont riches en réserves et possèdent une forte capacité de régénération. Dans ce contexte, l'émission racinaire peut représenter une réponse prioritaire de survie permettant au fragment de rétablir un contact fonctionnel avec le milieu, tandis que l'émission végétative, plus coûteuse en carbone, serait davantage inhibée (de Kroon et van Groenendaal, 1997 ; Klimešová et Klimeš, 2007 ; Grime, 2001).

Les résultats suggèrent aussi un effet dose-réponse, mais non strictement linéaire dans tous les cas. Chez *C. dactylon*, l'inhibition maximale apparaît déjà à 75 % SM, tandis que 100 % SM laisse une très faible émission racinaire résiduelle. Chez *P. australis*, 75 % SM et 100 % SM sont très proches pour l'inhibition totale. Ce type de réponse non parfaitement monotone est fréquent en allélopathie. Il peut résulter de la variabilité intrinsèque des propagules, de la différence de viabilité initiale, de la présence de plusieurs familles de composés ayant des effets antagonistes ou additifs, ou encore d'un effet hormétique à faibles ou moyennes doses (Calabrese et Baldwin, 2003 ; Duke et al., 2006 ; Belz, 2007).

La standardisation par nœud initial constitue une force méthodologique de cette étude. Chaque nœud représente une unité potentielle de reprise, contenant parfois un bourgeon, des primordia racinaires ou des tissus capables de redémarrer. En divisant les émissions par le nombre initial de nœuds, l'analyse corrige partiellement l'hétérogénéité morphologique initiale. Les résultats standardisés confirment les résultats bruts, ce qui indique que l'effet observé n'est pas simplement lié à une différence de nombre de nœuds, mais à une inhibition biologique de la capacité d'émission par unité nodale.

Du point de vue agroécologique, ces résultats ouvrent la possibilité d'utiliser *C. acutum* comme source de substances à potentiel bioherbicide ou comme matériau végétal à valoriser dans des stratégies de gestion intégrée des adventices vivaces. Toutefois, l'application directe au champ doit rester prudente. Les bioessais In Vitro maximisent le contact entre propagules et extrait, alors que dans le sol les composés sont soumis à dilution, adsorption sur les argiles et la matière organique, dégradation microbienne, oxydation, photodégradation et interactions avec les ions du sol (Blum, 1998 ; Inderjit et Callaway, 2003 ; Reigosa et al., 2006).

La confrontation avec les recherches similaires est cohérente. De nombreuses études sur les extraits aqueux végétaux montrent que les fortes concentrations inhibent davantage la germination, la croissance racinaire et la croissance des plantules que les faibles concentrations (Rice, 1984 ; Rizvi et Rizvi, 1992 ; Narwal, 1994 ; Chou, 1999 ; Batish et al., 2007 ; Farooq et al., 2011 ; Cheng et Cheng, 2015). Les travaux sur les composés phénoliques, flavonoïdes, terpènes et alcaloïdes indiquent que les racines sont souvent la cible primaire des substances allélopathiques, avec des effets secondaires sur la croissance aérienne (Macías et al., 2007 ; Weir et al., 2004 ; Li et al., 2010).

II.2. Effet des poudres de feuilles et de plante entière de *C. acutum* sur la reprise végétative de *C. dactylon* et *P. australis*

L'essai in vivo évalue la capacité de fragments rhizomateux de deux graminées vivaces problématiques des systèmes oasiens, *C. dactylon* et *P. australis*, à émettre des racines adventives et des pousses végétatives en présence de poudres sèches de *C. acutum*. Deux matrices végétales de la plante donneuse ont été comparées : poudre de feuilles et poudre de plante entière. Trois doses ont été appliquées en plus du témoin : T_1,75g, T_2,5g et T_5g. Les réponses biologiques ont été suivies à l'échelle du nœud, ce qui est pertinent pour des espèces dont la persistance écologique dépend de méristèmes nodaux, de bourgeons rhizomateux et de réserves souterraines (Holm et al., 1977 ; Harper, 1977 ; Radosevich et al., 2007 ; Soares et al., 2023 ; Mal et Narine, 2004).

L'approche adoptée ne se limite donc pas à un test de germination classique. Elle cible un processus fonctionnel beaucoup plus robuste chez les adventices pérennes : la reprise végétative à partir de propagules clonales. Cette nuance est essentielle, car le contrôle biologique ou bioherbicidal de *C. dactylon* et de *P. australis* n'est réellement agronomique que s'il perturbe la transition nœud-racine-pousse, la néoformation de racines adventives, l'émergence de ramets, puis l'installation autonome de la nouvelle unité clonale (Haslam, 1972 ; Mal et Narine, 2004 ; Albert et al., 2015 ; Hazelton et al., 2014).

II.2.1. Présentation des résultats biologiques

Les figures générales et les tableaux de synthèse montrent une réponse hautement organisée, dose-dépendante et biologiquement cohérente. Dans les témoins, les deux espèces expriment une forte capacité de reprise végétative. Cette vigueur est particulièrement marquée lorsque les fragments rhizomateux sont associés à la modalité plante entière dans le témoin : chez *C. dactylon*, l'émission totale moyenne atteint $6,62 \pm 0,34$, alors qu'elle est de $4,83 \pm 0,29$ sous la série feuilles ; chez *P. australis*, elle atteint $9,17 \pm 0,59$ dans la série plante entière contre $5,00 \pm 0,48$ dans la série feuilles. Cette différence de niveau basal, observée avant interprétation toxicologique, rappelle que la qualité physiologique des propagules, la distribution des réserves et le statut des bourgeons conditionnent fortement la dynamique de croissance clonale (Harper, 1977 ; Grime, 2001 ; Lambers et al., 2008).

Le tableau 14 présente, pour chaque plante cible, chaque matrice de *C. acutum* et chaque dose, les principales réponses biologiques mesurées en fin d'essai.

Tableau 14. Réponses biologiques principales (moyenne $\pm$ erreur standard).

Plante cible	Partie	Traitement	Emiss. rac.	Emiss. veg.	Emiss. tot.	Emiss./nœud	Long. rac.	Long. veg.	Long. tot.
<i>C. dactylon</i>	Feuilles	Témoin	$2,75 \pm 0,21$	$2,08 \pm 0,15$	$4,83 \pm 0,29$	0,60	$0,42 \pm 0,04$	$0,12 \pm 0,01$	$0,54 \pm 0,05$
<i>C. dactylon</i>	Feuilles	T_1,75g	$2,00 \pm 0,18$	$0,25 \pm 0,09$	$2,25 \pm 0,22$	0,28	$0,29 \pm 0,02$	$0,02 \pm 0,01$	$0,31 \pm 0,02$
<i>C. dactylon</i>	Feuilles	T_2,5g	$0,79 \pm 0,15$	$0,00 \pm 0,00$	$0,79 \pm 0,15$	0,10	$0,08 \pm 0,02$	$0,00 \pm 0,00$	$0,08 \pm 0,02$
<i>C. dactylon</i>	Feuilles	T_5g	$0,00 \pm 0,00$	$0,00 \pm 0,00$	$0,00 \pm 0,00$	0,00	$0,00 \pm 0,00$	$0,00 \pm 0,00$	$0,00 \pm 0,00$
<i>C. dactylon</i>	Plante entière	Témoin	$4,88 \pm 0,26$	$1,75 \pm 0,15$	$6,62 \pm 0,34$	0,83	$2,11 \pm 0,23$	$0,18 \pm 0,05$	$2,29 \pm 0,23$
<i>C. dactylon</i>	Plante entière	T_1,75g	$3,29 \pm 0,19$	$0,50 \pm 0,16$	$3,79 \pm 0,23$	0,47	$0,89 \pm 0,18$	$0,04 \pm 0,01$	$0,93 \pm 0,17$

Plante cible	Partie	Traitement	Emiss. rac.	Emiss. veg.	Emiss. tot.	Emiss./nœud	Long. rac.	Long. veg.	Long. tot.
<i>C. dactylon</i>	Plante entière	T_2,5g	2,50 ± 0,18	0,00 ± 0,00	2,50 ± 0,18	0,31	0,89 ± 0,18	0,00 ± 0,00	0,89 ± 0,18
<i>C. dactylon</i>	Plante entière	T_5g	0,75 ± 0,24	0,00 ± 0,00	0,75 ± 0,24	0,09	0,27 ± 0,12	0,00 ± 0,00	0,27 ± 0,12
<i>P. australis</i>	Feuilles	Témoin	3,50 ± 0,38	1,50 ± 0,19	5,00 ± 0,48	1,25	0,89 ± 0,19	0,24 ± 0,06	1,14 ± 0,18
<i>P. australis</i>	Feuilles	T_1,75g	1,33 ± 0,14	0,33 ± 0,14	1,67 ± 0,14	0,42	0,89 ± 0,19	0,06 ± 0,03	0,95 ± 0,20
<i>P. australis</i>	Feuilles	T_2,5g	0,42 ± 0,15	0,00 ± 0,00	0,42 ± 0,15	0,10	0,19 ± 0,11	0,00 ± 0,00	0,19 ± 0,11
<i>P. australis</i>	Feuilles	T_5g	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,00	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00
<i>P. australis</i>	Plante entière	Témoin	6,08 ± 0,53	3,08 ± 0,31	9,17 ± 0,59	2,29	1,50 ± 0,40	0,24 ± 0,06	1,74 ± 0,38
<i>P. australis</i>	Plante entière	T_1,75g	3,42 ± 0,50	0,33 ± 0,14	3,75 ± 0,59	0,94	0,14 ± 0,02	0,04 ± 0,02	0,18 ± 0,03
<i>P. australis</i>	Plante entière	T_2,5g	2,58 ± 0,29	0,08 ± 0,08	2,67 ± 0,28	0,67	0,14 ± 0,01	0,02 ± 0,02	0,16 ± 0,02
<i>P. australis</i>	Plante entière	T_5g	0,33 ± 0,14	0,00 ± 0,00	0,33 ± 0,14	0,08	0,03 ± 0,01	0,00 ± 0,00	0,03 ± 0,01

Lecture du tableau 14 : les témoins expriment les valeurs les plus élevées, notamment pour les émissions totales. La baisse est nette dès T_1,75g, devient très marquée à T_2,5g et atteint souvent une suppression quasi totale à T_5g, surtout avec la poudre de feuilles. Les émissions végétatives sont le compartiment le plus précocement affecté.

L'effet de *C. acutum* apparaît d'abord sur les émissions végétatives. Dans presque toutes les combinaisons, les pousses aériennes disparaissent ou deviennent marginales dès T_2,5g. Chez *C. dactylon* traité par poudre de feuilles, les émissions végétatives passent de $2,08 \pm 0,15$ en témoin à $0,25 \pm 0,09$ à T_1,75g, puis à 0 à T_2,5g et T_5g. Chez *P. australis*, la même architecture de réponse est observée: la composante végétative est rapidement annihilée, alors que certains nœuds conservent transitoirement une émission racinaire. Ce basculement d'une réponse mixte vers une réponse racinaire seule, puis vers aucune émission, constitue l'un des résultats les plus importants de l'essai.

La figure 14 illustre l'effet des poudres de *C. acutum* sur les émissions racinaires, qui représentent la première composante de la reprise fonctionnelle des fragments rhizomateux.

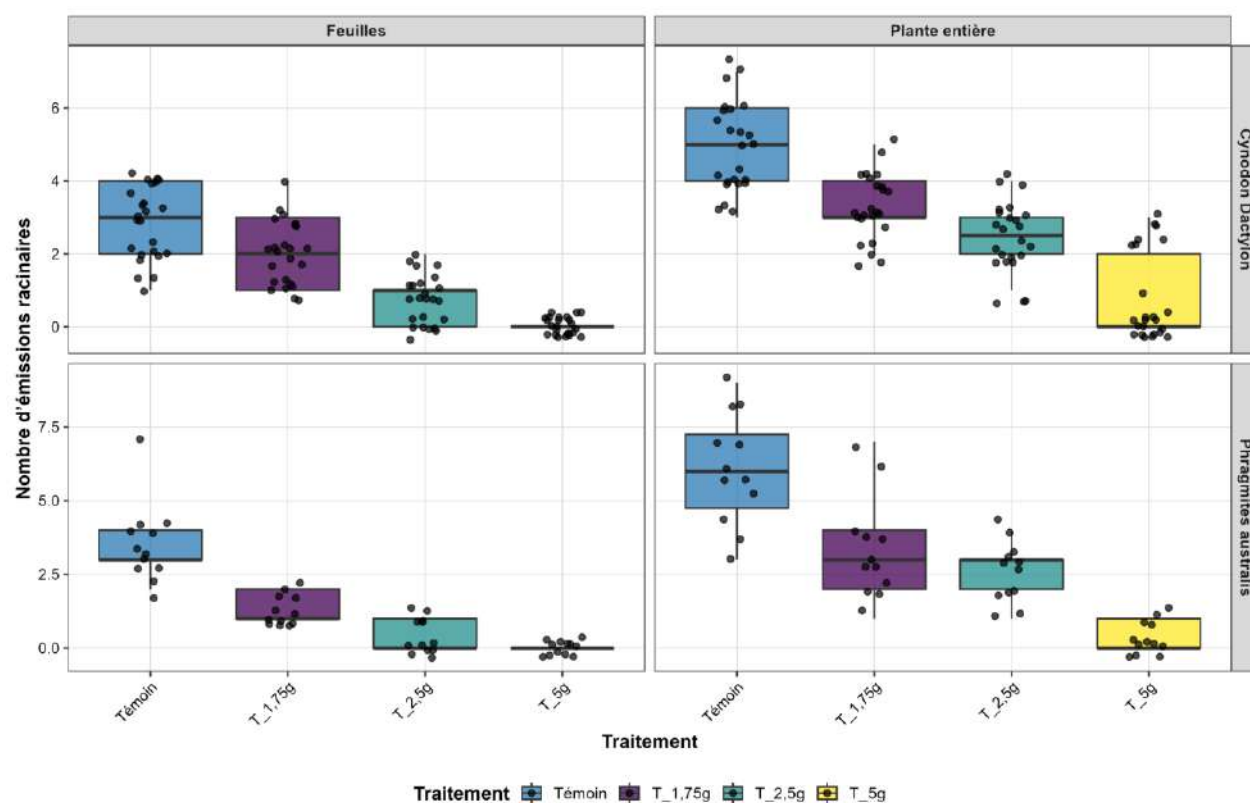


Figure 14. Effet des poudres de *C. acutum* sur les émissions racinaires.

Lecture de la figure 14 : les témoins présentent les émissions racinaires les plus fortes. Les traitements réduisent progressivement cette réponse, avec un effondrement net à T_5g. La racine reste cependant plus résistante que la pousse aux doses faibles et intermédiaires.

La figure 15 présente la réponse des émissions végétatives, c'est-à-dire la capacité des fragments à produire de nouvelles pousses à partir des nœuds.

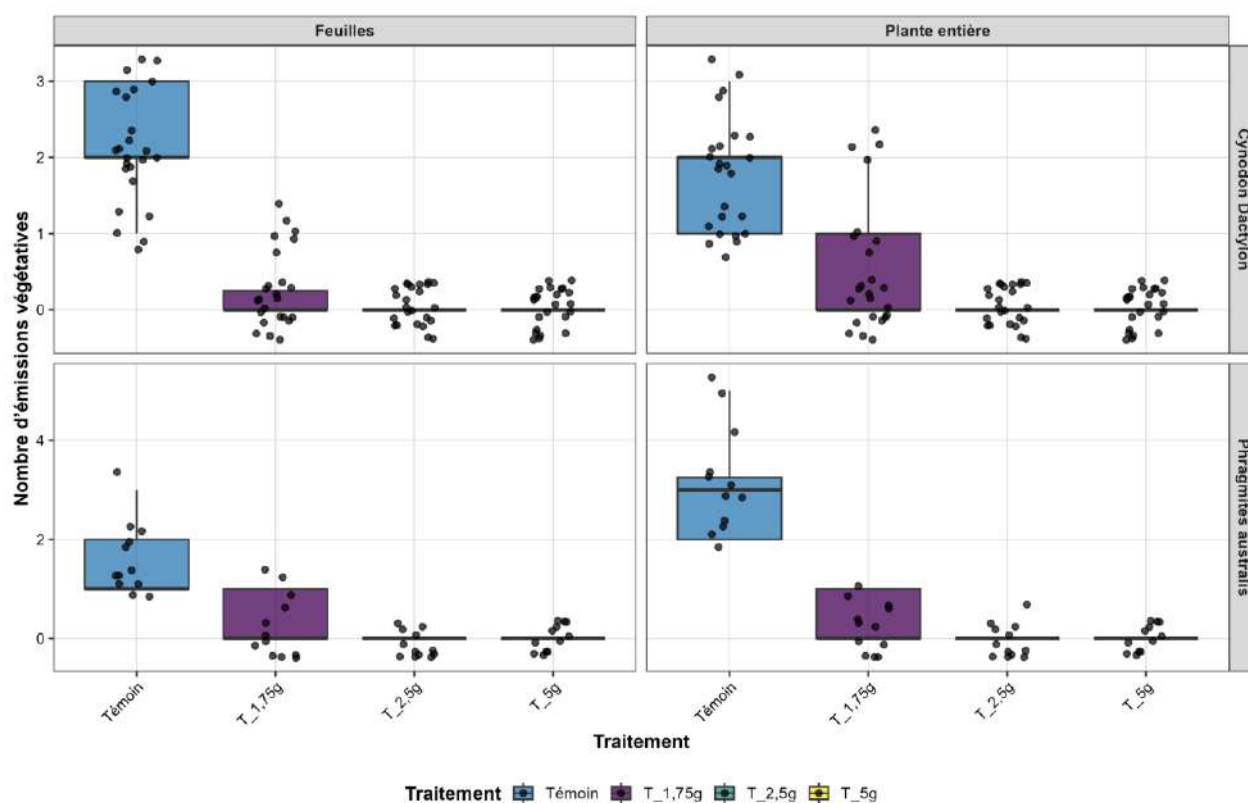


Figure 15. Effet des poudres de *C. acutum* sur les émissions végétatives.

Lecture de la figure 15 : la composante végétative est très sensible aux poudres de *C. acutum*. Les émissions végétatives diminuent fortement dès T_1,75g et deviennent nulles ou quasi nulles à T_2,5g et T_5g, ce qui compromet directement la reprise clonale.

La composante racinaire est plus résistante que la composante végétative, mais elle finit également par s'effondrer avec l'augmentation de la dose. Chez *C. dactylon* avec poudre de feuilles, l'émission racinaire moyenne chute de $2,75 \pm 0,21$ en témoin à $2,00 \pm 0,18$ à T_1,75g, puis $0,79 \pm 0,15$ à T_2,5g, pour atteindre 0 à T_5g. Avec la poudre de plante entière, la décroissance est moins brutale aux doses faibles et intermédiaires, puisque l'émission racinaire demeure de $3,29 \pm 0,19$ à T_1,75g et de $2,50 \pm 0,18$ à T_2,5g, mais elle est très fortement réduite à T_5g. Chez *P. australis*, le même gradient s'exprime, avec une inhibition forte dès T_1,75g et une quasi-extinction à T_5g.

La figure 16 regroupe les émissions totales et permet d'apprécier la réponse globale des propagules, en intégrant simultanément les composantes racinaire et végétative.

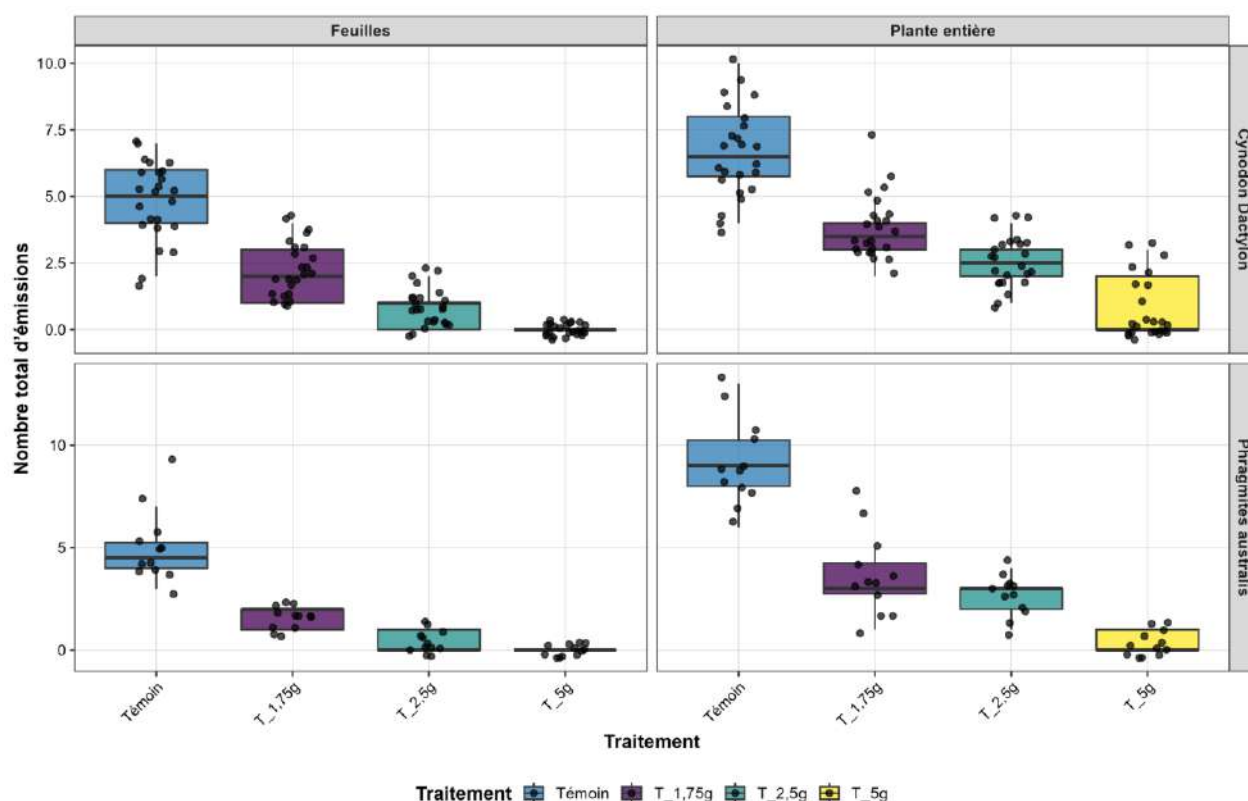


Figure 16. Effet des poudres de *C. acutum* sur les émissions totales.

Lecture de la figure 16 : l'émission totale confirme la réponse dose-dépendante. Les témoins se distinguent nettement des traitements, et T_5g correspond au niveau d'inhibition le plus élevé, avec une réponse souvent nulle ou résiduelle.

Les longueurs confirment et amplifient ce diagnostic. La longueur végétative corrigée devient nulle ou quasi nulle dans la majorité des traitements, alors que la longueur racinaire montre parfois une persistance limitée à faible dose. Ce résultat est physiologiquement important: l'allélopathie ne se limite pas ici à réduire le nombre d'organes émis; elle affecte aussi l'élongation post-initiation, c'est-à-dire la capacité des organes nouvellement initiés à dépasser le stade de primordium fonctionnel. Cette dissociation entre initiation et croissance est fréquemment décrite dans les réponses aux allelochimiques, notamment lorsque ceux-ci perturbent l'auxine, l'activité mitotique, la respiration, l'intégrité membranaire et le métabolisme oxydatif (Einhellig, 1995; Weir et al., 2004; Inderjit et Duke, 2003; Li et al., 2010).

La figure 17 présente les longueurs racinaires corrigées, indicateur de l'élongation post-initiation et de la capacité potentielle d'ancrage des fragments.

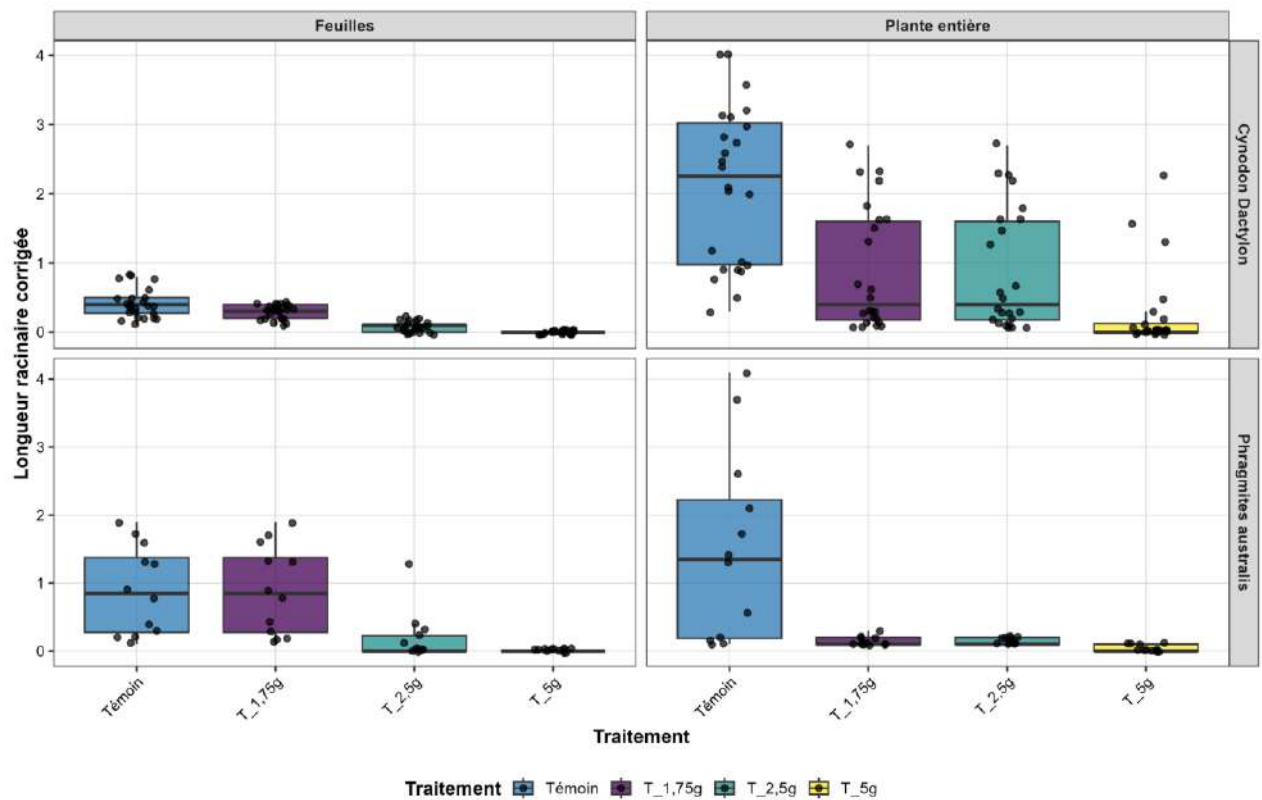


Figure 17. Effet des poudres de *C. acutum* sur la longueur racinaire.

Lecture de la figure 17 : les longueurs racinaires diminuent fortement sous traitement. Même lorsque quelques racines apparaissent, leur allongement reste limité, ce qui réduit leur valeur fonctionnelle pour l'ancrage et l'absorption hydrominérale.

La figure 18 présente les longueurs végétatives corrigées, qui traduisent la capacité des pousses initiées à entrer dans une croissance aérienne fonctionnelle.

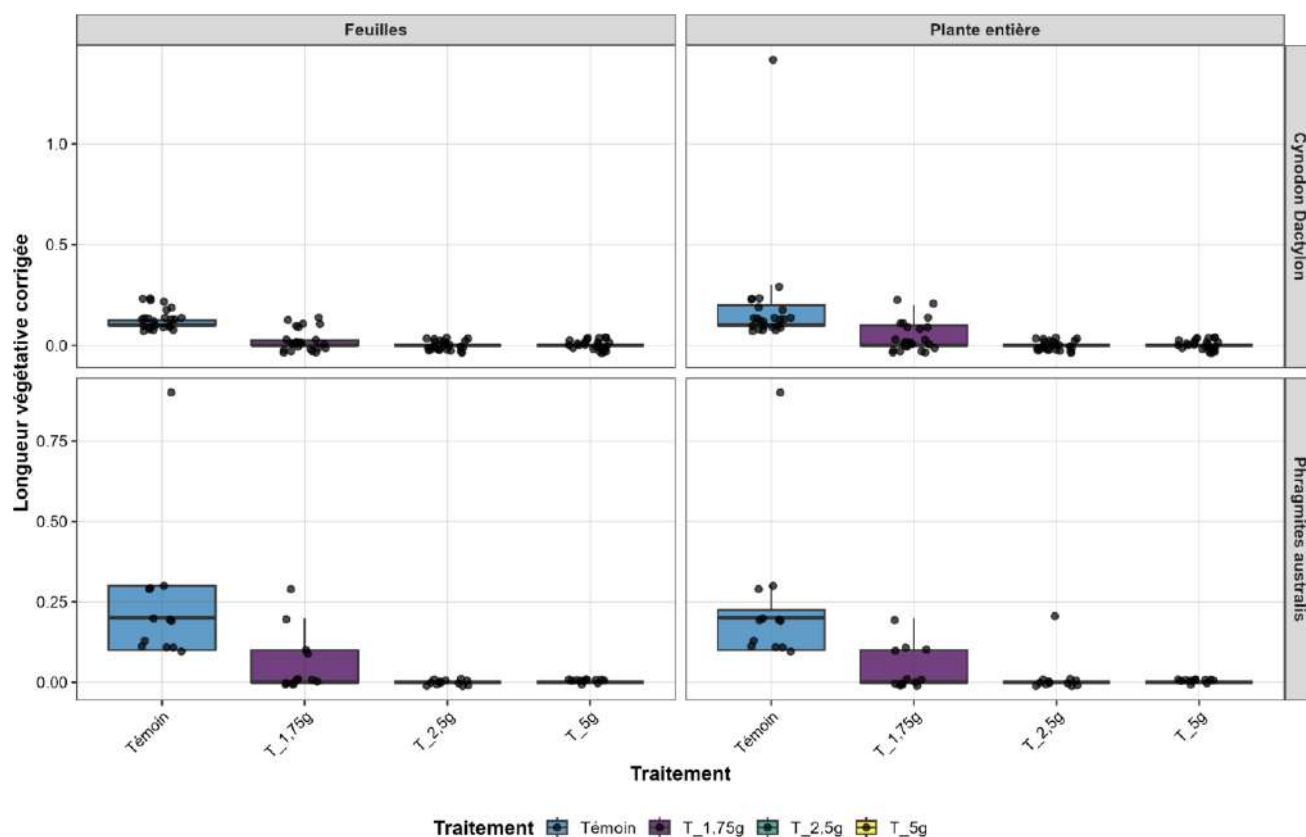


Figure 18. Effet des poudres de *C. acutum* sur la longueur végétative.

Lecture de la figure 5 : les longueurs végétatives sont presque entièrement supprimées aux doses élevées. Cette réponse montre que l'effet ne porte pas seulement sur l'initiation des pousses, mais aussi sur leur croissance ultérieure.

II.2.2. Interprétation des résultats biologiques

II.2.2.1. Réponse dose- phytotoxicité cumulative

Le gradient T_{1,75g} - T_{2,5g} - T_{5g} traduit une phytotoxicité cumulative. La dose faible agit comme un filtre physiologique: elle réduit la vigueur, désorganise la réponse mixte et limite les pousses. La dose intermédiaire franchit un seuil fonctionnel: elle supprime presque entièrement l'émission végétative et réduit fortement l'activité racinaire. La dose forte correspond à un niveau d'extinction morphogénétique: l'émission devient nulle ou résiduelle. Cette structure dose-réponse est conforme aux modèles d'action des résidus allélopathiques, où l'intensité de l'effet dépend de la concentration, de la vitesse de libération, de la solubilité, de l'adsorption sur le substrat, de la dégradation microbienne et de la sensibilité de l'espèce réceptrice (Rice, 1984; Putnam et Tang, 1986; Inderjit et Duke, 2003; Reigosa et al., 2006; Cheng et Cheng, 2015).

La dose T_{5g} est particulièrement déterminante. Chez *C. dactylon* traité par feuilles, elle entraîne 100 % d'inhibition des émissions racinaires, végétatives et totales, ainsi que 100 % d'inhibition des longueurs. Chez *P. australis* traité par feuilles, elle produit également une suppression totale. Avec la plante entière, T_{5g} reste très fortement inhibitrice, mais la réponse peut conserver quelques émissions racinaires résiduelles, notamment chez *P. australis*. Cela suggère que la poudre de

feuilles possède une activité plus radicale sur la capacité de réémission, alors que la plante entière exerce une pression intense mais parfois moins complètement létale sur l'initiation racinaire.

Le tableau 15 synthétise l'inhibition relative des émissions et des longueurs par rapport aux témoins correspondants, ce qui permet d'apprécier directement l'intensité phytotoxique des poudres.

Tableau 15. Inhibition (%) des émissions et des longueurs par rapport au témoin.

Plante	Partie	Traitement	Inhib. rac.	Inhib. veg.	Inhib. tot.	Inhib. long. rac.	Inhib. long. veg.	Inhib. long. tot.
C. dactylon	Feuilles	T_1,75g	27,3	88,0	53,4	31,0	80,0	42,3
C. dactylon	Feuilles	T_2,5g	71,2	100,0	83,6	80,0	100,0	84,6
C. dactylon	Feuilles	T_5g	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
C. dactylon	Plante entière	T_1,75g	32,5	71,4	42,8	57,9	77,3	59,5
C. dactylon	Plante entière	T_2,5g	48,7	100,0	62,3	57,9	100,0	61,3
C. dactylon	Plante entière	T_5g	84,6	100,0	88,7	87,4	100,0	88,4
P. australis	Feuilles	T_1,75g	61,9	77,8	66,7	0,0	76,1	16,4
P. australis	Feuilles	T_2,5g	88,1	100,0	91,7	78,5	100,0	83,1
P. australis	Feuilles	T_5g	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
P. australis	Plante entière	T_1,75g	43,8	89,2	59,1	90,6	82,3	89,5
P. australis	Plante entière	T_2,5g	57,5	97,3	70,9	90,6	92,9	90,9
P. australis	Plante entière	T_5g	94,5	100,0	96,4	97,8	100,0	98,1

Lecture du tableau 15 : l'inhibition suit un gradient dose-dépendant. Les feuilles entraînent 100 % d'inhibition à T_5g chez les deux espèces pour les principales émissions et longueurs. La plante entière reste très inhibitrice, mais laisse parfois une réponse racinaire résiduelle, surtout chez *P. australis*.

La figure 19 synthétise l'inhibition des émissions racinaires, végétatives et totales par rapport au témoin.

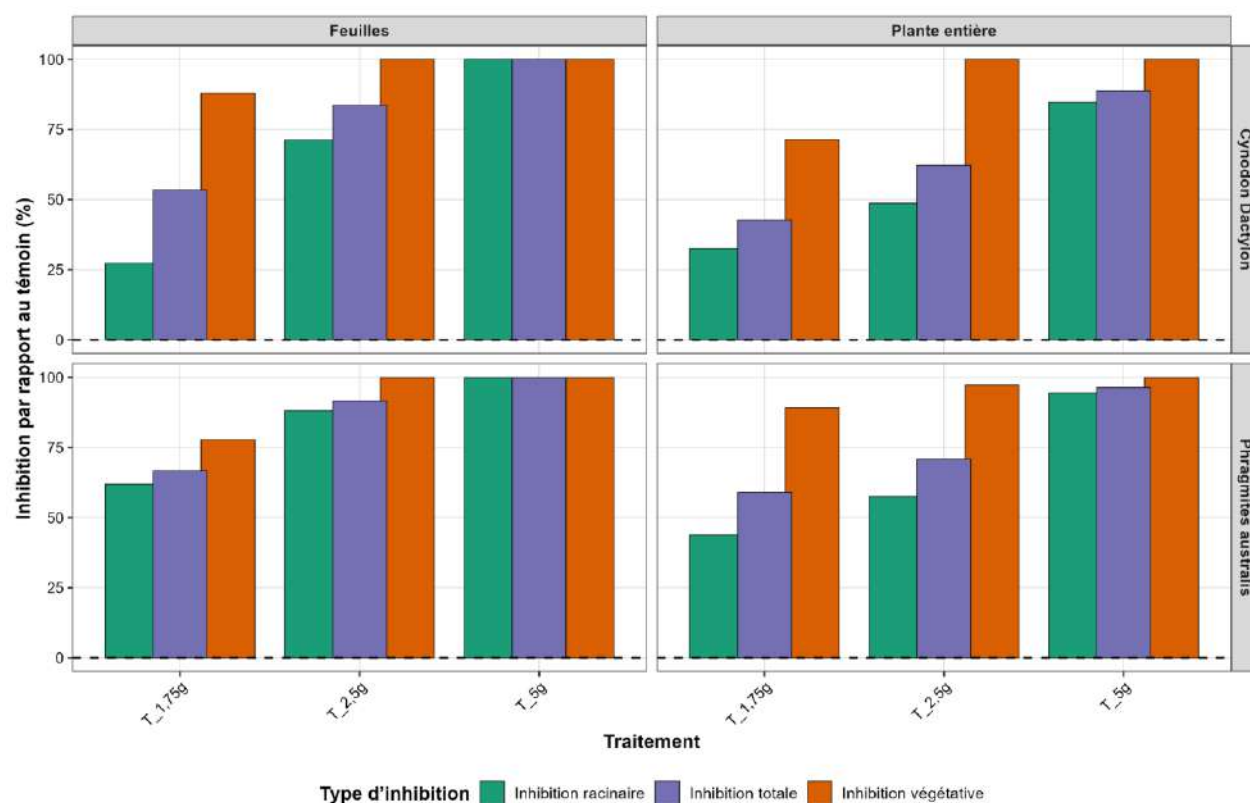


Figure 19. Inhibition des émissions racinaires, végétatives et totales par rapport au témoin.

Lecture de la figure 19 : l'inhibition des émissions augmente avec la dose. Les émissions végétatives sont les plus rapidement inhibées, alors que les émissions racinaires peuvent persister faiblement aux doses modérées.

La figure 20 synthétise l'inhibition des longueurs racinaires, végétatives et totales, afin de compléter la lecture basée sur le nombre d'émissions.

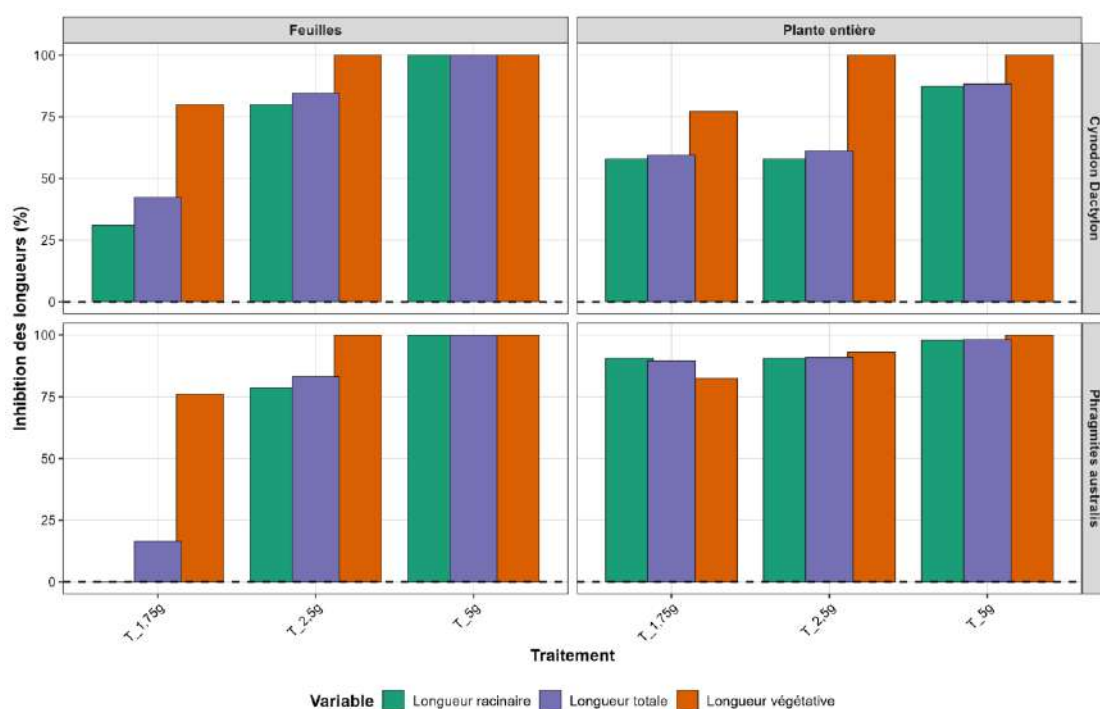


Figure 20. Inhibition des longueurs racinaires, végétatives et totales.

Lecture de la figure 20 : les longueurs présentent une inhibition très forte, parfois supérieure à celle du nombre d'émissions. Cela indique une action sur l'élongation des organes et pas uniquement sur l'apparition des primordia.

La figure 21 présente une carte thermique de l'émission totale moyenne, utile pour visualiser rapidement les combinaisons plante × partie × dose les plus favorables ou les plus suppressives.

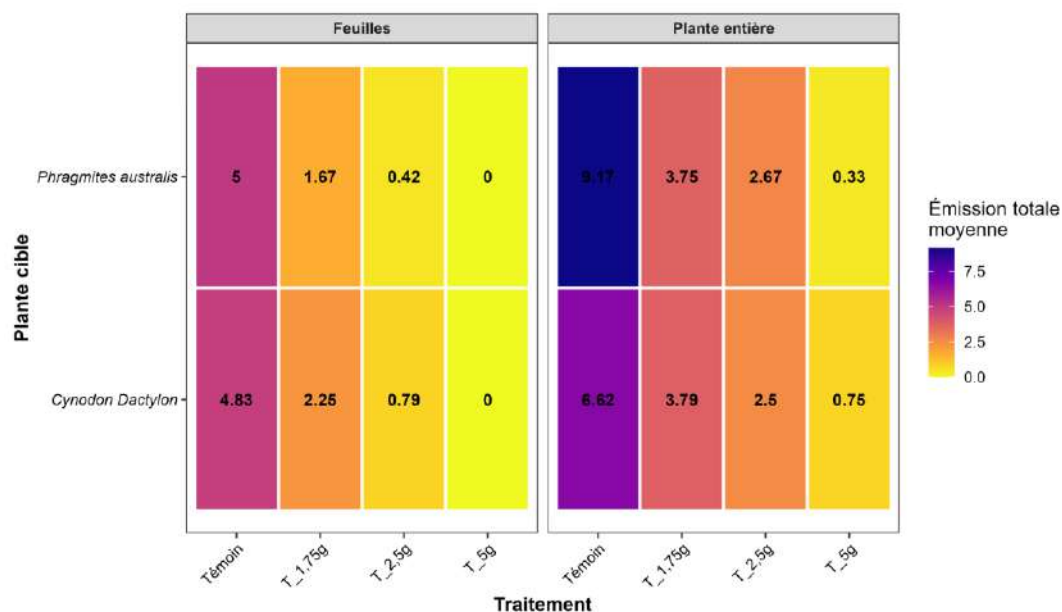


Figure 21. Carte thermique de l'émission totale moyenne.

Lecture de la figure 21 : les témoins correspondent aux valeurs chaudes les plus élevées, tandis que les fortes doses déplacent les combinaisons vers des valeurs faibles. La carte met en évidence l'efficacité de T_5g et la forte sensibilité des émissions totales.

La figure 22 présente la carte thermique de l'inhibition totale par rapport au témoin, ce qui permet d'identifier directement les traitements les plus efficaces.

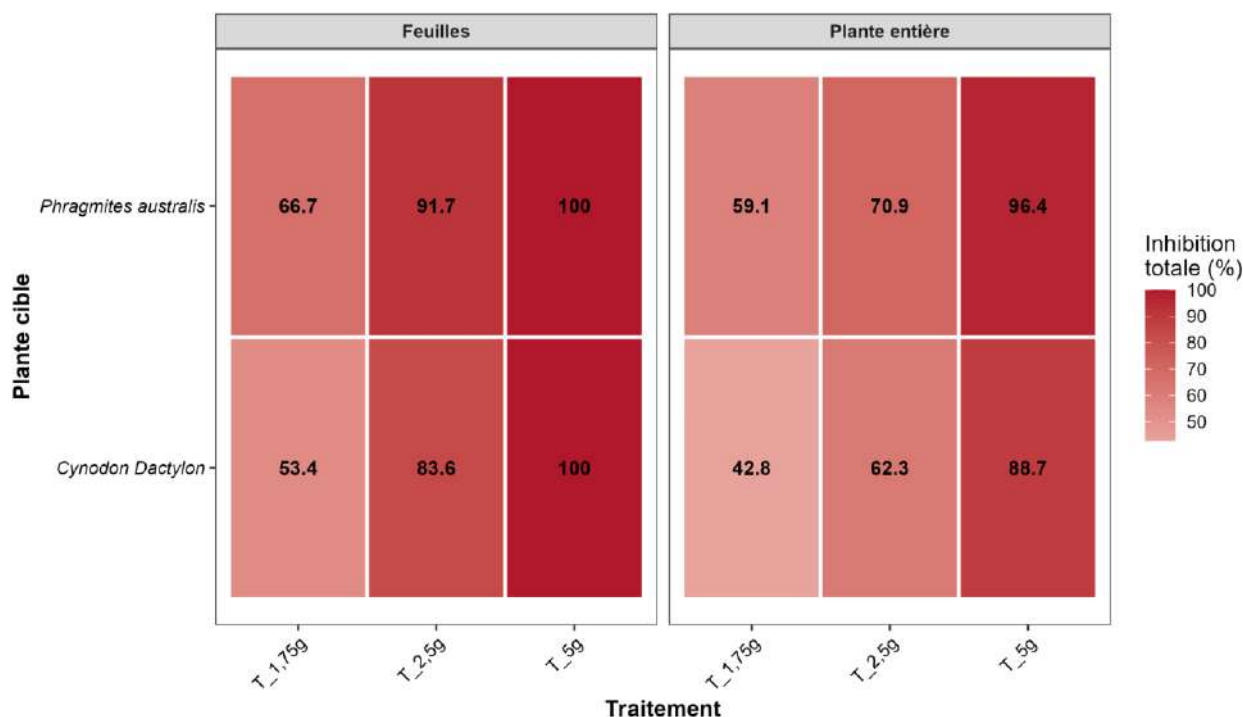


Figure 22. Carte thermique de l'inhibition totale par rapport au témoin.

Lecture de la figure 9 : les niveaux d'inhibition les plus élevés se concentrent à T_5g, puis à T_2,5g. Les feuilles apparaissent particulièrement suppressives, notamment lorsque l'objectif est de bloquer totalement la reprise.

II.2.2.2. Hiérarchie de sensibilité :

Le compartiment végétatif aérien est la première cible visible. Les émissions végétatives sont totalement inhibées à T_2,5g et T_5g dans la plupart des combinaisons. Cette vulnérabilité peut s'expliquer par la dépendance des bourgeons nodaux à un réseau coordonné de signaux hormonaux, de flux de carbone, de respiration mitochondriale et de division cellulaire. Les allelochimiques sont connus pour modifier l'équilibre auxine/cytokinine, réduire l'activité des méristèmes, inhiber l'élongation cellulaire et provoquer des désordres oxydatifs qui pénalisent surtout les tissus jeunes en croissance rapide (Einhellig, 1995; Weir et al., 2004; Taiz et al., 2015; Hopkins et Hüner, 2009).

L'émission racinaire est moins immédiatement supprimée, ce qui traduit une stratégie de survie clonale: le fragment rhizomateux tente d'abord de restaurer l'absorption hydrominérale avant d'investir dans la croissance aérienne. Cette réponse racinaire seule, très fréquente à T_1,75g et T_2,5g, ne doit donc pas être interprétée comme une absence d'effet. Elle représente plutôt un état de stress morphogénétique, où la plante maintient un minimum d'organogenèse mais perd la capacité de produire une architecture fonctionnelle complète. Dans un contexte agronomique, un fragment qui émet seulement quelques racines courtes mais pas de pousse viable reste fortement compromis, car il ne peut ni reconstituer rapidement une surface photosynthétique, ni assurer une colonisation compétitive du substrat.

La figure 23 décrit la répartition des types biologiques de réponse et permet de distinguer les fragments à réponse mixte, racinaire seule, végétative seule ou sans émission.

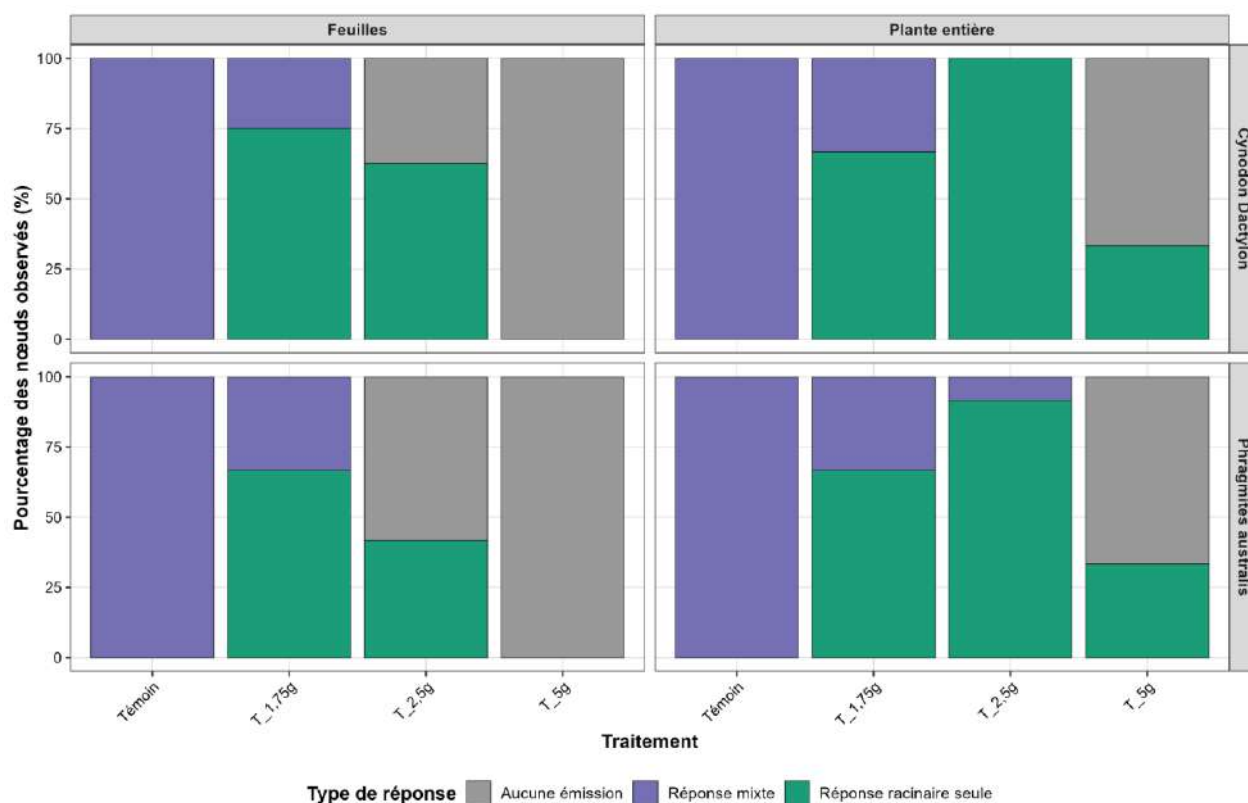


Figure 23. Répartition des types biologiques de réponse.

Lecture de la figure 23 : les témoins sont dominés par les réponses mixtes, alors que les traitements déplacent progressivement les fragments vers la réponse racinaire seule puis vers l'absence d'émission. Cette transition est un marqueur de désorganisation de la régénération clonale.

II.2.3. Comparaison entre feuilles et plante entière de *C. acutum*

La comparaison feuilles versus plante entière indique que la partie utilisée modifie la nature et l'intensité de l'effet. Les feuilles semblent particulièrement efficaces pour provoquer l'extinction complète à forte dose et pour inhiber très rapidement les émissions végétatives. Ce profil est compatible avec l'accumulation foliaire de métabolites secondaires hydrosolubles ou semi-polaires, tels que composés phénoliques, flavonoïdes, coumarines, saponines, alcaloïdes, terpénoïdes et glycosides cardiotoniques, déjà signalés dans *C. acutum* ou dans des Asclepiadoideae apparentées (Abu Ziada et al., 2016; Khelifi et al., 2023; Harborne, 1988; Wink, 2010).

La plante entière, parce qu'elle mélange feuilles, tiges et autres tissus, peut diluer certains composés fortement actifs mais apporter une diversité chimique plus large. Cette diversité peut expliquer une inhibition très marquée des longueurs, notamment chez *P. australis*, où l'inhibition de la longueur totale atteint 89,5 % dès T_1,75g et 90,9 % à T_2,5g. Une telle réponse suggère une action prioritaire sur l'elongation post-initiation plutôt que sur la seule initiation des organes. Dans les bioessais allélopathiques, les effets sur la longueur radiculaire et caulinaire sont souvent plus sensibles que les simples comptages d'émission, car l'elongation dépend immédiatement des flux membranaires,

de l'extensibilité pariétale et de l'activité mitotique des apex (Blum, 1996; Li et al., 2010; Scavo et Mauromicale, 2021).

II.2.3.1. Réponse de *C. dactylon*

C. dactylon est une graminée pérenne C4 très agressive, capable de se propager par stolons et rhizomes, avec une forte aptitude de régénération à partir de fragments nodaux (Holm et al., 1977; Mahmoodzadeh et al., 2010; Soares et al., 2023). Dans cet essai, cette plasticité est visible dans les témoins, mais elle est sévèrement fragilisée par *C. acutum*. Sous poudre de feuilles, la réponse est presque idéale du point de vue bioherbicidal: inhibition progressive, suppression précoce de la pousse, puis extinction complète à T_5g. Sous plante entière, *C. dactylon* conserve davantage d'émissions racinaires à T_1,75g et T_2,5g, mais l'émission végétative est complètement annulée dès T_2,5g, ce qui compromet fortement la reprise clonale.

L'intérêt agronomique de ce résultat est élevé. La lutte contre *C. dactylon* est difficile parce que la destruction de la partie aérienne ne suffit pas; il faut perturber la viabilité des nœuds rhizomateux et la capacité de ramification clonale. Les résultats indiquent que la poudre de *C. acutum* agit précisément sur ces deux dimensions: nombre d'émissions et croissance des organes émis. Ce double effet est plus prometteur qu'un simple ralentissement de la croissance aérienne, car il touche le mécanisme même de recolonisation après travail du sol ou fragmentation mécanique (Radosevich et al., 2007; Monaco et al., 2002; Zimdahl, 2018; Soares et al., 2023).

II.2.3.2. Réponse de *P. australis*

P. australis présente une vigueur témoin supérieure, surtout dans la modalité plante entière, ce qui reflète sa biologie de macrophyte rhizomateuse capable de produire des clones persistants, des réserves importantes et des réseaux souterrains puissants (Haslam, 1972; Mal et Narine, 2004; Kiviat, 2013; Albert et al., 2015). Malgré cette robustesse, l'inhibition observée est très forte. Sous feuilles, l'émission totale chute de 5,00 à 1,67 à T_1,75g, puis 0,42 à T_2,5g et 0 à T_5g. Sous plante entière, l'émission totale passe de 9,17 à 3,75, puis 2,67 et 0,33. La plante conserve donc une capacité racinaire résiduelle à faible et moyenne doses, mais sa composante végétative est presque totalement neutralisée.

La particularité de *P. australis* réside dans la dissociation entre inhibition des émissions et inhibition des longueurs. Les feuilles de *C. acutum* inhibent fortement le nombre d'émissions, mais la longueur racinaire n'est pas réduite à T_1,75g. À l'inverse, la poudre de plante entière provoque une forte inhibition des longueurs dès la dose faible. Cette différence suggère des modes d'action partiellement distincts : la poudre de feuilles agirait surtout sur l'initiation organogène et l'émergence des axes, alors que la poudre de plante entière affecterait davantage l'élongation et l'expansion post-initiation. Cette hypothèse devra être vérifiée par des mesures biochimiques ciblées.

II.2.4. Validation par les résultats statistiques

Les tableaux statistiques essentiels sont présentés ci-dessous afin de soutenir directement l'argumentation principale. Les diagnostics complets et les planches graphiques détaillées sont reportés en annexes pour préserver la lisibilité du chapitre.

II.2.4.1. Effets des traitements sur les variables biologiques

Le tableau 16a présente la synthèse globale du modèle non paramétrique en distinguant l'effet de la plante cible, de la partie utilisée de *C. acutum* et du traitement.

Tableau 16a. Synthèse du modèle global non paramétrique : effets plante cible, partie de *C. acutum* et traitement.

Variable	p plante cible	p partie utilisée	p traitement	Interprétation
Émission racinaire	0.666	9.15e-12	4.66e-36	Effet traitement très hautement significatif
Émission racinaire par nœud initial	4.14e-04	9.61e-11	2.15e-34	Effet traitement très hautement significatif
Émission totale	0.672	8.77e-08	1.80e-44	Effet traitement très hautement significatif
Émission totale par nœud initial	0.002	2.58e-07	6.90e-42	Effet traitement très hautement significatif
Émission végétative	0.721	0.548	1.41e-48	Effet traitement très hautement significatif
Émission végétative par nœud initial	0.135	0.633	2.04e-47	Effet traitement très hautement significatif
Longueur racinaire	0.068	7.75e-05	1.46e-31	Effet traitement très hautement significatif
Longueur racinaire par nœud initial	0.37	3.53e-05	1.07e-31	Effet traitement très hautement significatif
Longueur totale	0.166	4.62e-05	1.78e-35	Effet traitement très hautement significatif
Longueur totale par nœud initial	0.205	3.28e-05	1.70e-35	Effet traitement très hautement significatif
Longueur végétative	0.287	0.66	2.30e-45	Effet traitement très hautement significatif
Longueur végétative par nœud initial	0.051	0.648	2.03e-44	Effet traitement très hautement significatif

Lecture du tableau 16a : le facteur traitement est très hautement significatif pour toutes les variables, avec des p-values extrêmement faibles. La partie utilisée de *C. acutum* influence surtout les émissions racinaires, les émissions totales et les longueurs, tandis que l'effet plante cible est plus variable selon les paramètres.

Ce tableau montre que le facteur traitement est très hautement significatif pour l'ensemble des variables, ce qui valide statistiquement la lecture dose-réponse observée sur les figures.

Le tableau 9b détaille l'effet du traitement dans chaque combinaison plante cible × partie utilisée, afin de vérifier la robustesse de l'effet à l'intérieur de chaque situation expérimentale.

Tableau 16b. Effet du traitement dans chaque combinaison plante cible × partie de *C. acutum* (Kruskal-Wallis).

Plante cible	Partie	Variable	n	χ^2	ddl	p	Interprétation
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	Émission racinaire	96	63.55	3	1.03e-13	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	Émission racinaire par nœud initial	96	63.55	3	1.03e-13	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	Émission totale	96	74.12	3	5.59e-16	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	Émission totale par nœud initial	96	74.12	3	5.59e-16	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	Émission végétative	96	70.04	3	4.19e-15	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	émission végétative par nœud initial	96	70.04	3	4.19e-15	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	longueur racinaire corrigée	96	44.03	3	1.49e-09	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	longueur racinaire par nœud initial	96	44.03	3	1.49e-09	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	longueur totale corrigée	96	47.53	3	2.69e-10	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	longueur totale par nœud initial	96	47.53	3	2.69e-10	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	longueur végétative corrigée	96	69.61	3	5.18e-15	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	longueur végétative par nœud initial	96	69.61	3	5.18e-15	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	émission racinaire	96	68.58	3	8.59e-15	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	émission racinaire par nœud initial	96	68.58	3	8.59e-15	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	émission totale	96	78.72	3	5.77e-17	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	émission totale par nœud initial	96	78.72	3	5.77e-17	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	émission végétative	96	79.72	3	3.53e-17	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	émission végétative par nœud initial	96	79.72	3	3.53e-17	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	longueur racinaire corrigée	96	73.48	3	7.67e-16	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	longueur racinaire par nœud initial	96	73.48	3	7.67e-16	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	longueur totale corrigée	96	78.6	3	6.12e-17	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	longueur totale par nœud initial	96	78.6	3	6.12e-17	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	longueur végétative corrigée	96	75.21	3	3.27e-16	Effet traitement très hautement significatif
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	longueur végétative par nœud initial	96	75.21	3	3.27e-16	Effet traitement très hautement significatif

Plante cible	Partie	Variable	n	χ^2	ddl	p	Interprétation
<i>P. australis</i>	Plante entière	émission racinaire	48	35.29	3	1.06e-07	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Plante entière	émission racinaire par nœud initial	48	35.29	3	1.06e-07	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Plante entière	émission totale	48	38.91	3	1.82e-08	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Plante entière	émission totale par nœud initial	48	38.91	3	1.82e-08	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Plante entière	émission végétative	48	37.97	3	2.87e-08	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Plante entière	émission végétative par nœud initial	48	37.97	3	2.87e-08	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Plante entière	longueur racinaire corrigée	48	28.44	3	2.94e-06	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Plante entière	longueur racinaire par nœud initial	48	28.44	3	2.94e-06	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Plante entière	longueur totale corrigée	48	36.36	3	6.29e-08	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Plante entière	longueur totale par nœud initial	48	36.36	3	6.29e-08	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Plante entière	longueur végétative corrigée	48	32.14	3	4.89e-07	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Plante entière	longueur végétative par nœud initial	48	32.14	3	4.89e-07	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Feuilles	émission racinaire	48	40.52	3	8.26e-09	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Feuilles	émission racinaire par nœud initial	48	40.52	3	8.26e-09	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Feuilles	émission totale	48	42.07	3	3.89e-09	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Feuilles	émission totale par nœud initial	48	42.07	3	3.89e-09	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Feuilles	émission végétative	48	36.49	3	5.90e-08	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Feuilles	émission végétative par nœud initial	48	36.49	3	5.90e-08	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Feuilles	longueur racinaire corrigée	48	30.79	3	9.43e-07	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Feuilles	longueur racinaire par nœud initial	48	30.79	3	9.43e-07	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Feuilles	longueur totale corrigée	48	32.79	3	3.57e-07	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Feuilles	longueur totale par nœud initial	48	32.79	3	3.57e-07	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Feuilles	longueur végétative corrigée	48	34.5	3	1.56e-07	Effet traitement très hautement significatif
<i>P. australis</i>	Feuilles	longueur végétative par nœud initial	48	34.5	3	1.56e-07	Effet traitement très hautement significatif

Lecture du tableau 16b : dans chaque combinaison expérimentale, les valeurs de Kruskal-Wallis confirment un effet traitement très hautement significatif. Les réponses les plus structurées concernent les émissions végétatives, les émissions totales et les longueurs totales, ce qui valide statistiquement l'effet dose-réponse observé biologiquement.

Les valeurs de χ^2 élevées, associées à des probabilités très faibles, traduisent une séparation nette entre les témoins et les traitements, surtout aux doses T_2,5g et T_5g.

II.2.4.2. Comparaisons post-hoc entre les doses et le témoin

Le tableau 16c présente les comparaisons post-hoc de Dunn entre le témoin et chaque dose, avec correction FDR, pour préciser à partir de quelle dose l'écart au témoin devient statistiquement significatif.

Tableau 16c. Comparaisons post-hoc de Dunn entre le témoin et chaque dose de *C. acutum*; p ajustées FDR et niveau de significativité.

Plante cible	Partie	Variable	Témoin vs T_1,75g	Témoin vs T_2,5g	Témoin vs T_5g
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	Émission racinaire	0.129 (ns)	2.23e-06 (****)	3.04e-13 (****)
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	Émission racinaire par nœud initial	0.129 (ns)	2.23e-06 (****)	3.04e-13 (****)
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	émission totale	0.004 (**)	7.43e-09 (****)	4.49e-16 (****)
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	Émission totale par nœud initial	0.004 (**)	7.43e-09 (****)	4.49e-16 (****)
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	Émission végétative	1.24e-09 (****)	6.23e-14 (****)	6.23e-14 (****)
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	Émission végétative par nœud initial	1.24e-09 (****)	6.23e-14 (****)	6.23e-14 (****)
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	Longueur racinaire corrigée	0.237 (ns)	3.11e-07 (****)	3.59e-13 (****)
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	Longueur racinaire par nœud initial	0.237 (ns)	3.11e-07 (****)	3.59e-13 (****)
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	Longueur totale corrigée	0.038 (*)	8.17e-09 (****)	7.12e-15 (****)
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	Longueur totale par nœud initial	0.038 (*)	8.17e-09 (****)	7.12e-15 (****)
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	Longueur végétative corrigée	1.86e-08 (****)	2.47e-13 (****)	2.47e-13 (****)
<i>C. Dactylon</i>	Feuilles	Longueur végétative par nœud initial	1.86e-08 (****)	2.47e-13 (****)	2.47e-13 (****)
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	Émission racinaire	0.005 (**)	4.01e-06 (****)	5.68e-14 (****)
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	Émission racinaire par nœud initial	0.005 (**)	4.01e-06 (****)	5.68e-14 (****)
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	Émission totale	0.002 (**)	6.48e-08 (****)	9.02e-16 (****)
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	Émission totale par nœud initial	0.002 (**)	6.48e-08 (****)	9.02e-16 (****)
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	Émission végétative	1.39e-06 (****)	1.28e-12 (****)	1.28e-12 (****)
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	Émission végétative par nœud initial	1.39e-06 (****)	1.28e-12 (****)	1.28e-12 (****)
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	Longueur racinaire corrigée	0.002 (**)	0.002 (**)	1.98e-10 (****)

Plante cible	Partie	Variable	Témoïn vs T_1,75g	Témoïn vs T_2,5g	Témoïn vs T_5g
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	Longueur racinaire par nœud initial	0.002 (**)	0.002 (**)	1.98e-10 (****)
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	Longueur totale corrigée	0.002 (**)	6.77e-04 (***)	3.49e-11 (****)
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	Longueur totale par nœud initial	0.002 (**)	6.77e-04 (****)	3.49e-11 (****)
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	Longueur végétative corrigée	2.27e-06 (****)	1.50e-12 (****)	1.50e-12 (****)
<i>C. Dactylon</i>	Plante entière	Longueur végétative par nœud initial	2.27e-06 (****)	1.50e-12 (****)	1.50e-12 (****)
<i>P. australis</i>	Feuilles	Émission racinaire	0.026 (*)	9.28e-06 (****)	2.40e-08 (****)
<i>P. australis</i>	Feuilles	Émission racinaire par nœud initial	0.026 (*)	9.28e-06 (****)	2.40e-08 (****)
<i>P. australis</i>	Feuilles	Émission totale	0.024 (*)	3.72e-06 (****)	2.05e-08 (****)
<i>P. australis</i>	Feuilles	Émission totale par nœud initial	0.024 (*)	3.72e-06 (****)	2.05e-08 (****)
<i>P. australis</i>	Feuilles	Émission végétative	4.03e-04 (****)	5.21e-07 (****)	5.21e-07 (****)
<i>P. australis</i>	Feuilles	Émission végétative par nœud initial	4.03e-04 (****)	5.21e-07 (****)	5.21e-07 (****)
<i>P. australis</i>	Feuilles	Longueur racinaire corrigée	1 (ns)	0.003 (**)	1.89e-05 (****)
<i>P. australis</i>	Feuilles	Longueur racinaire par nœud initial	1 (ns)	0.003 (**)	1.89e-05 (****)
<i>P. australis</i>	Feuilles	Longueur totale corrigée	0.614 (ns)	8.72e-04 (****)	7.97e-06 (****)
<i>P. australis</i>	Feuilles	Longueur totale par nœud initial	0.614 (ns)	8.72e-04 (****)	7.97e-06 (****)
<i>P. australis</i>	Feuilles	Longueur végétative corrigée	9.91e-04 (****)	1.10e-06 (****)	1.10e-06 (****)
<i>P. australis</i>	Feuilles	Longueur végétative par nœud initial	9.91e-04 (****)	1.10e-06 (****)	1.10e-06 (****)
<i>P. australis</i>	Plante entière	Émission racinaire	0.032 (*)	0.005 (**)	2.63e-08 (****)
<i>P. australis</i>	Plante entière	Émission racinaire par nœud initial	0.032 (*)	0.005 (**)	2.63e-08 (****)
<i>P. australis</i>	Plante entière	Émission totale	0.008 (**)	0.001 (**)	3.48e-09 (****)
<i>P. australis</i>	Plante entière	Émission totale par nœud initial	0.008 (**)	0.001 (**)	3.48e-09 (****)
<i>P. australis</i>	Plante entière	Émission végétative	5.25e-05 (****)	8.86e-07 (****)	3.31e-07 (****)
<i>P. australis</i>	Plante entière	Émission végétative par nœud initial	5.25e-05 (****)	8.86e-07 (****)	3.31e-07 (****)
<i>P. australis</i>	Plante entière	Longueur racinaire corrigée	0.02 (*)	0.025 (*)	6.32e-07 (****)
<i>P. australis</i>	Plante entière	Longueur racinaire par nœud initial	0.02 (*)	0.025 (*)	6.32e-07 (****)
<i>P. australis</i>	Plante entière	Longueur totale corrigée	0.003 (**)	0.002 (**)	1.10e-08 (****)
<i>P. australis</i>	Plante entière	Longueur totale par nœud initial	0.003 (**)	0.002 (**)	1.10e-08 (****)
<i>P. australis</i>	Plante entière	Longueur végétative corrigée	4.83e-04 (****)	1.01e-05 (****)	2.04e-06 (****)
<i>P. australis</i>	Plante entière	Longueur végétative par nœud initial	4.83e-04 (****)	1.01e-05 (****)	2.04e-06 (****)

Lecture du tableau 16c : les écarts au témoin deviennent souvent significatifs dès T_1,75g pour les variables végétales et les longueurs. À T_2,5g et surtout à T_5g, les différences sont presque systématiquement hautement significatives, confirmant que la dose forte constitue le niveau le plus suppressif.

Le post-hoc de Dunn confirme que l'écart au témoin devient souvent significatif dès T_1,75g pour les variables les plus sensibles et devient systématique à T_5g pour les émissions et plusieurs longueurs corrigées.

II.2.4.3. Corrélations entre émissions racinaires et végétales

La figure 24 examine la relation entre émissions racinaires et végétales chez *C. dactylon*.

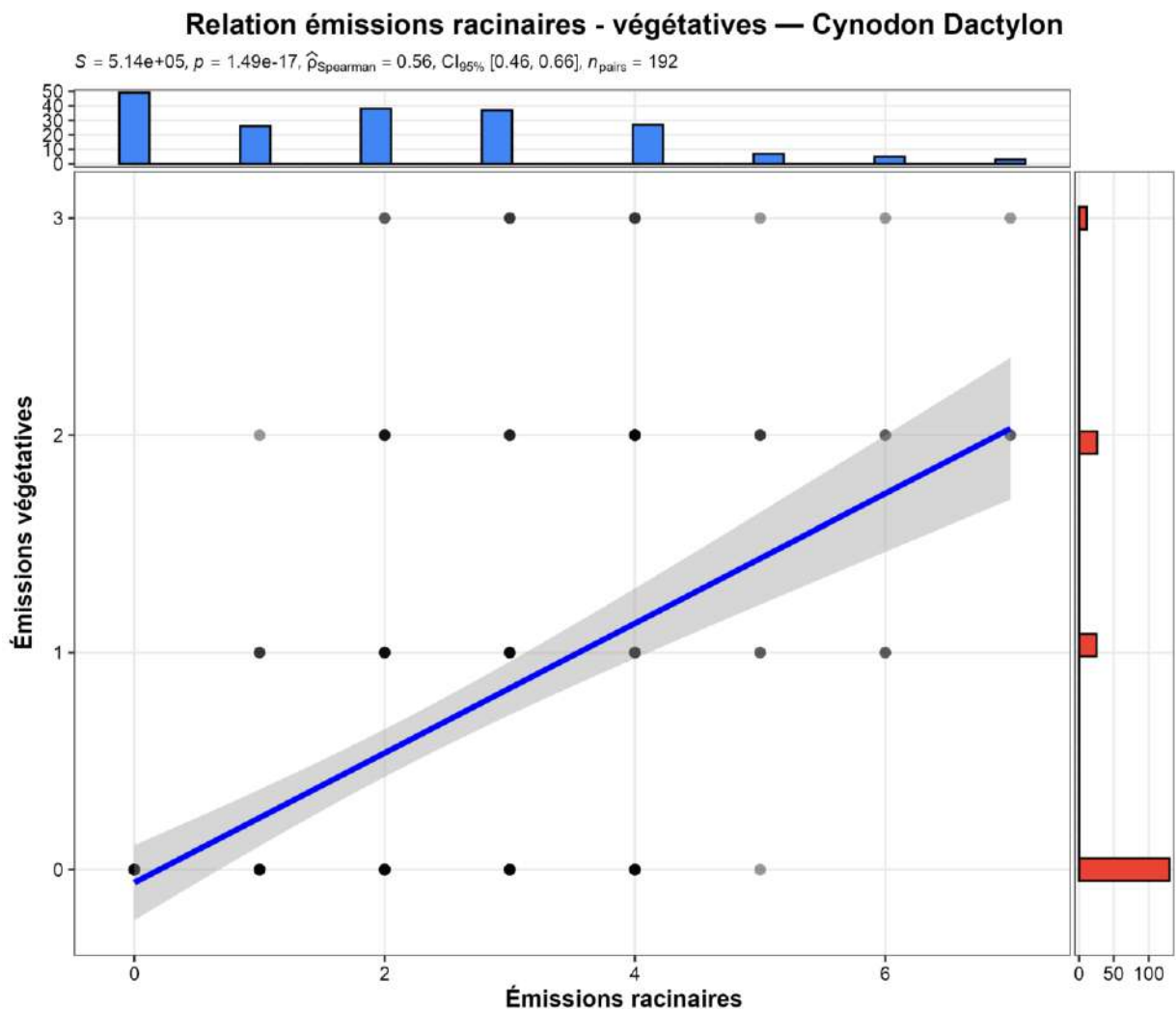


Figure 24. Relation entre les émissions racinaires et végétales chez *C. dactylon*.

Lecture de la figure 24 : chez *C. dactylon*, la relation positive entre émissions racinaires et végétales indique que les fragments les plus aptes à produire des racines sont aussi ceux qui conservent le mieux leur potentiel de pousse.

La figure 12 examine la relation entre émissions racinaires et végétales chez *P. australis*.

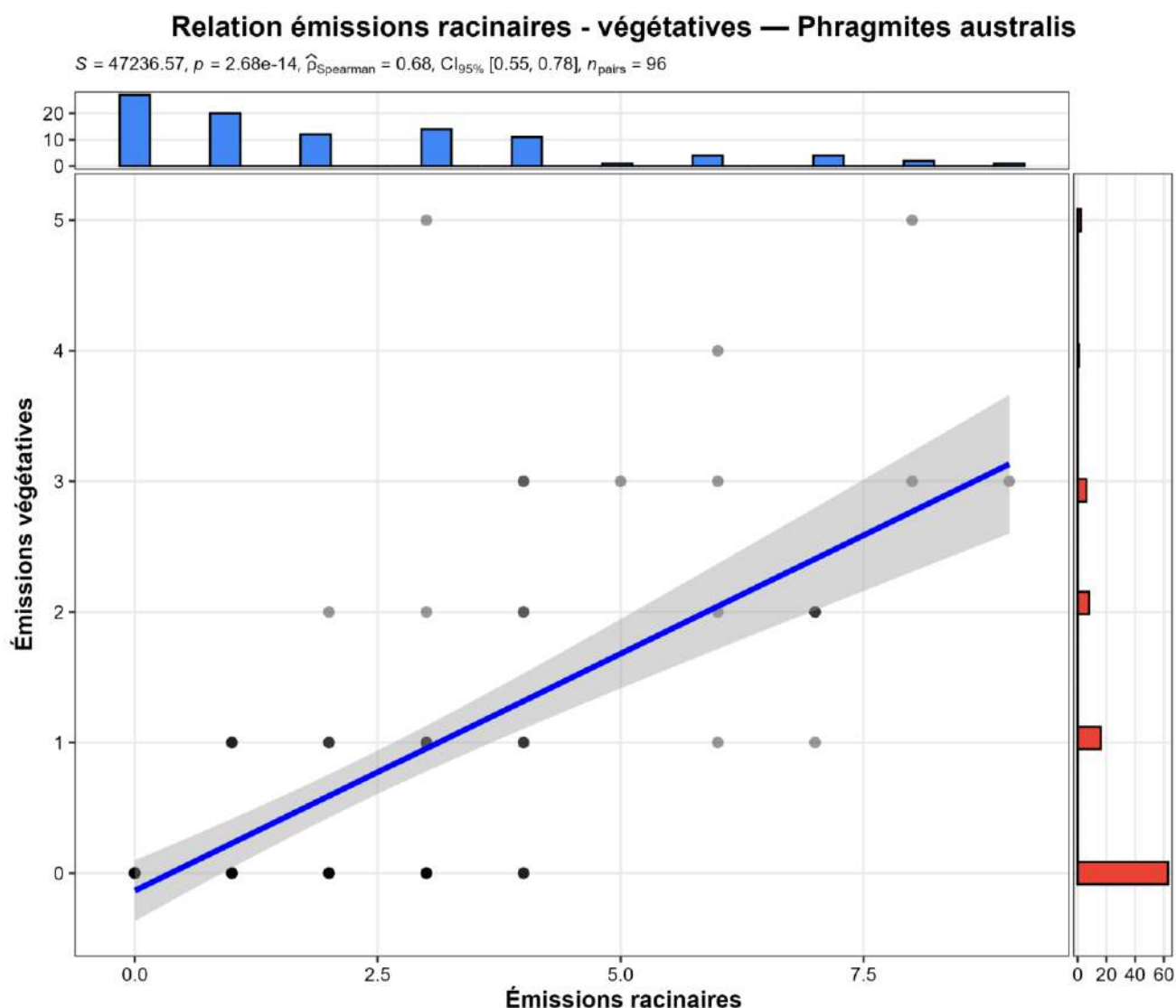


Figure 25. Relation entre les émissions racinaires et végétatives chez *P. australis*.

Lecture de la figure 25 : chez *P. australis*, la corrélation positive confirme le couplage entre rhizogenèse et reprise végétative, mais la dispersion traduit une dissociation plus importante entre les deux composantes sous contrainte.

Chez les deux plantes cibles, la corrélation de Spearman est positive et hautement significative, ce qui indique que les fragments capables d'émettre davantage de racines tendent aussi à conserver une meilleure réponse végétative. Cette relation soutient l'idée d'un couplage fonctionnel entre restauration de l'absorption hydrominérale et relance des bourgeons nodaux.

La lecture conjointe des médianes, de l'écrasement des distributions vers zéro et des comparaisons de Dunn montre que les traitements à base de *C. acutum* réduisent fortement la capacité de reprise des fragments végétatifs. Les planches statistiques détaillées sont fournies en annexes afin de documenter l'ensemble des variables sans alourdir le texte principal.

Cette réorganisation permet de faire correspondre chaque affirmation biologique aux sorties statistiques et aux figures de distribution qui la soutiennent, tout en conservant les figures générales de synthèse déjà présentes dans le document.

Les résultats statistiques confirment la lecture biologique. Les distributions étant fortement asymétriques, avec de nombreuses valeurs nulles dans les traitements inhibiteurs, le choix d'un test non paramétrique de Kruskal-Wallis est adapté. Le test compare les rangs entre traitements sans imposer la normalité des résidus. Les comparaisons post-hoc de Dunn avec correction de Benjamini-Hochberg contrôlent le risque d'erreur lié aux comparaisons multiples. Cette stratégie est méthodologiquement cohérente avec des variables de comptage, de longueur limitée par zéro et de réponse biologiquement censurée par l'absence d'émission (Conover, 1999 ; Zar, 2010 ; Gibbons et Chakraborti, 2011).

Toutes les variables principales présentent un effet traitement très hautement significatif. Chez *C. dactylon* traité par feuilles, les valeurs de Kruskal-Wallis sont extrêmement élevées : émissions végétatives $\chi^2 = 79,72$; émissions totales $\chi^2 = 78,72$; longueur totale corrigée $\chi^2 = 78,60$; longueur racinaire corrigée $\chi^2 = 73,48$, toujours avec $p < 0,001$. Les tailles d'effet ordinales, souvent comprises entre 0,72 et 0,84, indiquent un effet majeur et non une simple différence statistique de faible amplitude. Chez *P. australis* traité par feuilles, les tailles d'effet sont également très fortes, notamment pour les émissions totales et la longueur totale, avec ε^2 proche de 0,90.

Le tableau 10 reprend uniquement les effets traitement les plus structurants pour la discussion, afin de conserver dans le corps du texte les résultats statistiques les plus utiles à l'argumentation de nos résultats.

Tableau 17. Synthèse statistique des effets traitement les plus structurants.

Plante	Partie	Variable	Statistique	Conclusion
<i>C. dactylon</i>	Feuilles	Émissions racinaires	$\chi^2=68,58$; $p<0,001$; $\varepsilon^2=0,72$	Effet majeur
<i>C. dactylon</i>	Feuilles	Émissions végétatives	$\chi^2=79,72$; $p<0,001$; $\varepsilon^2=0,84$	Effet majeur
<i>C. dactylon</i>	Feuilles	Longueur totale	$\chi^2=78,60$; $p<0,001$; $\varepsilon^2=0,83$	Effet majeur
<i>C. dactylon</i>	Plante entière	Émissions totales	$\chi^2=74,12$; $p<0,001$; $\varepsilon^2=0,78$	Effet majeur
<i>C. dactylon</i>	Plante entière	Longueur racinaire	$\chi^2=44,03$; $p<0,001$; $\varepsilon^2=0,46$	Effet fort
<i>P. australis</i>	Feuilles	Émissions totales	$\chi^2=42,07$; $p<0,001$; $\varepsilon^2=0,90$	Effet majeur
<i>P. australis</i>	Feuilles	Longueur totale	$\chi^2=32,79$; $p<0,001$; $\varepsilon^2=0,90$	Effet majeur
<i>P. australis</i>	Plante entière	Émissions totales	$\chi^2=38,91$; $p<0,001$	Effet majeur
<i>P. australis</i>	Plante entière	Longueur totale	$\chi^2=36,36$; $p<0,001$	Effet majeur

Lecture du tableau17 : les tailles d'effet indiquées sont fortes à majeures. Les poudres de feuilles sur *C. dactylon* et *P. australis* donnent les réponses les plus structurées, mais la plante entière conserve également un effet très marqué sur les émissions totales et les longueurs.

Les tests de Dunn montrent que les comparaisons traitement-témoin deviennent significatives dès T_1,75g pour les variables les plus sensibles. Chez *C. dactylon*-feuilles, l'émission racinaire à

T_{1,75g} n'est pas significativement différente du témoin, mais les émissions totales, les émissions végétatives et la longueur totale le sont déjà. Cette situation confirme la hiérarchie de sensibilité : l'émission racinaire brute est un indicateur relativement conservateur, tandis que l'émission végétative et la longueur totale détectent plus tôt l'effet phytotoxique. À T_{2,5g} et T_{5g}, les différences deviennent massivement significatives pour presque toutes les variables.

La comparaison entre feuilles et plante entière révèle un effet de la matrice végétale utilisée. Chez *C. dactylon*, les différences entre parties sont très hautement significatives pour les émissions racinaires, totales et les longueurs à T_{2,5g}, ce qui confirme que la nature de la poudre module l'intensité de la réponse. Chez *P. australis*, la partie de *C. acutum* influence fortement les émissions à T_{1,75g} et T_{2,5g}, alors que certaines longueurs deviennent non significativement différentes à T_{2,5g}, probablement parce que les deux matrices atteignent un niveau d'inhibition déjà élevé. Lorsque les deux traitements produisent des valeurs nulles, le test devient non applicable, ce qui n'est pas une faiblesse mais le signe d'un effet plafond biologique.

II4. Discussion partielle

L'ensemble des résultats est compatible avec une action allélopathique à expression bioherbicidaire. L'allélopathie correspond à l'influence biochimique d'une plante sur une autre par libération de métabolites secondaires dans l'environnement, avec des effets inhibiteurs ou stimulants selon les concentrations, les espèces et les conditions écologiques (Molisch, 1937 ; Rice, 1984 ; Whittaker et Feeny, 1971 ; Putnam et Duke, 1978). Dans le présent essai, l'inhibition est nette, directionnelle, dose-dépendante, reproductible et validée statistiquement. Elle ne concerne pas seulement un trait isolé, mais un faisceau de traits morphogénétiques : émission racinaire, émission végétative, émission totale, longueurs et type de réponse.

Les poudres végétales incorporées ou mises au contact du substrat peuvent libérer progressivement des allelochimiques par lixiviation, décomposition, oxydation ou transformation microbienne. Les composés phénoliques, flavonoïdes, coumarines, terpénoïdes, saponines et alcaloïdes sont parmi les familles les plus souvent impliquées dans les effets phytotoxiques des résidus végétaux (Harborne, 1988 ; Macías et al., 2004 ; Li et al., 2010 ; Motmainna et al., 2023). *C. acutum* est particulièrement intéressant, car des travaux sur sa composition signalent des polyphénols, flavonoïdes, alcaloïdes, saponines, tanins, coumarines et glycosides cardiotoniques (Abu Ziada et al., 2016 ; Khelifi et al., 2023). Cette richesse chimique fournit un fondement plausible à l'effet observé.

La réduction des émissions végétatives peut être liée à une altération de la dormance et du débourrement des bourgeons nodaux. Les bourgeons de rhizomes ne s'activent que si plusieurs conditions convergent : disponibilité en réserves carbonées, hydratation, oxygénation, polarité hormonale, rapport auxine/cytokinine favorable et intégrité des méristèmes. Les allelochimiques peuvent perturber ces processus en modifiant la signalisation hormonale, l'activité enzymatique, la perméabilité membranaire, la respiration et la synthèse protéique (Einhellig, 1995 ; Weir et al., 2004 ; Taiz et al., 2015 ; Hopkins et Hüner, 2009).

L'inhibition des longueurs, surtout des longueurs racinaires et totales, peut résulter d'une perturbation de l'élongation cellulaire. Les racines jeunes sont des bioindicateurs très sensibles parce que leur croissance dépend d'une zone méristématique active, d'une zone d'élongation rapide et d'un gradient d'auxine très finement régulé. Les phénols et autres métabolites secondaires peuvent

provoquer une accumulation d'espèces réactives de l'oxygène, inhiber les pompes protoniques, modifier la plasticité pariétale et réduire l'activité mitotique (Blum, 1996 ; Li et al., 2010 ; Scavo et Mauromicale, 2021). La quasi-nullité des longueurs végétatives sous T_{2,5g} et T_{5g} indique que les tissus aériens nouvellement initiés sont incapables d'entrer dans une croissance autonome.

La transition observée entre réponse mixte, réponse racinaire seule et absence d'émission constitue une signature écologique de stress. Dans le témoin, tous les fragments produisent une réponse mixte, signe d'un couplage fonctionnel entre acquisition souterraine et croissance aérienne. Sous traitement, ce couplage est rompu : la racine persiste quelque temps, mais la pousse disparaît. À dose forte, même la réponse racinaire est supprimée. Une telle trajectoire traduit une désorganisation progressive de la régénération clonale, et non un simple ralentissement quantitatif.

Les résultats concordent avec les études montrant que les résidus végétaux peuvent réduire fortement la germination, l'émergence et la croissance des adventices. Khaliq et al. (2011) ont montré que des résidus de cultures allélopathiques peuvent provoquer des réductions importantes des longueurs racinaires et caulinaires. Wathugala et al. (2014) ont également mis en évidence le potentiel inhibiteur de résidus végétaux en bioessais et en pots. Les synthèses récentes soulignent que les résidus, extraits, paillis et plantes de couverture allélopathiques constituent des outils potentiels de gestion intégrée des adventices, à condition de maîtriser la dose, la sélectivité et la persistance (Cheng et Cheng, 2015 ; Khamare et al., 2022 ; Ain et al., 2023 ; Motmainna et al., 2023).

La spécificité de notre travail est de porter non pas sur des plantules issues de graines, mais sur des fragments rhizomateux. Cette originalité est importante car les rhizomes sont beaucoup plus difficiles à contrôler que les graines. Les herbicides ou bioherbicides qui agissent seulement sur la germination peuvent être insuffisants contre les adventices pérennes. En montrant une inhibition de la reprise végétative, notre essai se rapproche davantage d'une problématique réelle de désinfestation des palmeraies et de gestion des repousses après fragmentation mécanique du sol.

C. dactylon est classé parmi les adventices les plus difficiles au monde en raison de sa reproduction végétative efficace, de son système rhizomateux et stolonifère, de sa tolérance à la coupe, au pâturage, à la sécheresse et à la perturbation (Holm et al., 1977 ; Monaco et al., 2002 ; Mahmoodzadeh et al., 2010 ; Soares et al., 2023). Les rhizomes et stolons sont des réservoirs de propagules, et chaque nœud viable peut devenir un centre de régénération. Dans ce contexte, la suppression observée des émissions végétatives à T_{2,5g} et T_{5g} est agronomiquement décisive. Elle signifie que le traitement empêche le fragment de reconstituer rapidement une biomasse aérienne photosynthétique.

Le fait que la poudre de feuilles produise une inhibition totale à T_{5g} et une inhibition totale des émissions végétatives dès T_{2,5g} suggère une action particulièrement intéressante pour limiter la recolonisation de cette espèce dans les systèmes de palmeraies. Cependant, la persistance d'émissions racinaires à T_{1,75g} et, sous plante entière, à T_{2,5g} montre que les doses faibles peuvent ne pas suffire à éliminer complètement le potentiel de reprise. Une stratégie pratique devrait donc viser soit une dose seuil supérieure, soit une répétition d'application, soit une association avec dessiccation, solarisation, faux-semis, travail superficiel contrôlé ou couverture organique.

P. australis est une espèce clonale extrêmement compétitive dont les rhizomes permettent la persistance, l'expansion locale et la régénération après perturbation (Haslam, 1972 ; Mal et Narine, 2004 ; Kiviat, 2013 ; Hazelton et al., 2014 ; Albert et al., 2015). Sa gestion est difficile car les réseaux

rhizomateux accumulent des réserves et peuvent produire de nouveaux axes à partir de fragments. Dans notre essai, le témoin de *P. australis* présente la plus forte émission totale, ce qui confirme cette vigueur. Malgré cela, les poudres de *C. acutum* réduisent fortement la reprise, surtout à T_2,5g et T_5g.

La plante entière de *C. acutum* est particulièrement efficace sur les longueurs de *P. australis*, avec près de 90 % d'inhibition de la longueur totale dès T_1,75g. Ce résultat est remarquable : il indique que les organes éventuellement initiés restent très courts, donc probablement non fonctionnels. En conditions de terrain, cette réduction de l'allongement pourrait limiter l'ancrage, l'accès à l'eau et aux nutriments, ainsi que la capacité du fragment à produire des tiges émergentes. Pour une espèce comme *P. australis*, dont la compétitivité dépend de la vitesse d'installation clonale et de la production de biomasse, la réduction de longueur peut être aussi importante que la réduction du nombre d'émissions.

Dans les palmeraies, *C. dactylon* et *P. australis* posent un problème de compétition hydrique, de concurrence minérale, d'occupation de l'espace, d'entrave aux travaux culturaux et parfois de refuge pour bioagresseurs. La gestion chimique systématique est peu souhaitable dans des agroécosystèmes fragiles, souvent caractérisés par salinité, rareté de l'eau, forte évaporation et contraintes de main-d'œuvre. L'utilisation raisonnée de biomasses végétales locales à potentiel allélopathique pourrait s'inscrire dans une logique de protection intégrée, d'économie circulaire et de réduction de dépendance aux herbicides de synthèse (Cheng et Cheng, 2015 ; Khamare et al., 2022 ; Scavo et Mauromicale, 2021).

C. acutum, souvent considéré comme plante spontanée envahissante ou liane problématique, pourrait être requalifié comme ressource phytosanitaire potentielle si son activité est confirmée. Cette valorisation reste toutefois conditionnée à une évaluation rigoureuse : sélectivité vis-à-vis du palmier dattier et des cultures intercalaires, effet sur la microflore du sol, dynamique de décomposition, innocuité environnementale, persistance des métabolites, risque de phytotoxicité résiduelle et faisabilité économique de collecte, séchage, broyage et application.

L'essai constitue une preuve biologique forte, mais plusieurs limites doivent être reconnues. Premièrement, la composition chimique exacte des poudres n'a pas encore été quantifiée. Deuxièmement, le protocole ne distingue pas la part strictement allélopathique de la part éventuellement liée à des modifications physiques ou microbiologiques du substrat. Troisièmement, la réponse a été mesurée dans un dispositif contrôlé, alors que le champ introduira des facteurs de dilution, adsorption, photodégradation, lixiviation, activité microbienne et hétérogénéité hydrique. Quatrièmement, les effets sur les espèces cultivées n'ont pas encore été évalués. Ces limites ne diminuent pas la valeur des résultats ; elles définissent plutôt les étapes nécessaires pour passer du bioessai au prototype de gestion agronomique.

II.3. Discussion générale

Effet de Cynanchum acutum sur la multiplication végétative de C. dactylon et P. australis

II.3.1. Portée générale des résultats et originalité physiologique de l'étude

Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent que *Cynanchum acutum* exerce une pression inhibitrice très nette sur la reprise végétative de deux espèces adventices rhizomateuses majeures des palmeraies de Ouargla, *Cynodon dactylon* et *Phragmites australis*. L'intérêt principal de cette étude ne réside pas seulement dans la mise en évidence d'une phytotoxicité globale, mais dans la démonstration que cette phytotoxicité touche le mécanisme central de persistance de ces adventices : la régénération clonale à partir de fragments nodaux. Contrairement aux bioessais classiques portant sur la germination de graines, la présente expérimentation cible des propagules végétatives déjà différenciées, riches en réserves et munies de bourgeons capables de produire simultanément racines adventives et pousses. Cette orientation donne aux résultats une portée agronomique beaucoup plus forte pour les systèmes oasiens, où le problème pratique n'est pas seulement l'émergence de plantules, mais surtout la reprise rapide de fragments de rhizomes et de stolons après travail du sol, irrigation ou fragmentation mécanique. (Holm et al., 1977 ; Rice, 1984 ; de Kroon & van Groenendael, 1997 ; Klimešová & Klimeš, 2007 ; Radosevich et al., 2007)

L'ensemble des observations converge vers une conclusion biologique robuste : les traitements à base de *C. acutum* réduisent la rhizogenèse, la néoformation végétative, la réponse totale des fragments, les longueurs des organes néoformés et la trajectoire cumulative de reprise. Dans l'essai aqueux, la solution mère et ses dilutions provoquent une inhibition dose-dépendante marquée, avec une quasi-extinction des émissions aux fortes concentrations. Dans l'essai en pots, les poudres de feuilles et de plante entière réduisent fortement la capacité des fragments à passer d'un état de propagule latent à un état de ramet fonctionnel. Ce résultat est central : il indique que *C. acutum* n'agit pas uniquement comme ralentisseur de croissance, mais comme perturbateur du programme morphogénétique racine-pousse nécessaire à l'autonomisation clonale. (Weir et al., 2004 ; Li et al., 2010 ; Scavo & Mauromicale, 2021 ; Schulz & Tabaglio, 2024)

Les données disponibles indiquent que les émissions végétatives sont généralement plus précocement supprimées que les émissions racinaires. Ce schéma est physiologiquement cohérent. Un fragment rhizomateux stressé peut maintenir temporairement une émission racinaire minimale afin de restaurer l'absorption d'eau et de nutriments, alors que la production d'une pousse aérienne représente un investissement plus coûteux en carbone, en azote, en hormones et en activité méristématique. Le basculement observé entre réponse mixte, réponse racinaire seule et absence d'émission constitue donc un indicateur qualitatif majeur du stress allélopathique. Il montre que le traitement désorganise progressivement la coordination fonctionnelle entre ancrage souterrain et reconstruction de l'appareil aérien. (de Kroon & van Groenendael, 1997 ; Klimešová & Klimeš, 2007 ; Guo et al., 2021 ; Chen & Coughlan, 2026)

Cette interprétation est renforcée par l'utilisation de l'AUC, qui intègre la réponse sur toute la période expérimentale. Les AUC ne décrivent pas seulement l'état final à J21 ; elles renseignent sur la durée, la précocité et l'intensité cumulative de l'inhibition. Dans cette étude, la réduction parallèle des valeurs finales et des AUC indique que l'effet de *C. acutum* est précoce, durable et cumulatif. Un tel profil est particulièrement important en allélopathie, car deux traitements peuvent conduire à une valeur finale similaire tout en différant fortement par leur dynamique : un traitement peut retarder la reprise, un autre peut la bloquer dès les premiers jours. Ici, la forte diminution de l'AUC soutient l'hypothèse d'une atteinte précoce des tissus nodaux et des processus cellulaires nécessaires à l'émission. (Ranal & Santana, 2006 ; Ritz et al., 2015)

II.3.2. Cadre allélopathique actuel : des métabolites végétaux aux bioherbicides

L'allélopathie est aujourd'hui considérée comme une interaction biochimique complexe, impliquant la libération de métabolites spécialisés par les racines, feuilles, tiges, fleurs, fruits, litières ou résidus en décomposition. Les synthèses récentes insistent sur le fait que l'allélopathie n'est pas un simple phénomène de toxicité directe, mais un ensemble de processus modulés par la concentration, la forme chimique des composés, l'état physiologique de la plante réceptrice, le substrat, la microflore et les conditions hydriques (Schulz et Tabaglio, 2024 ; Pedrol et al., 2024 ; Xuan et al., 2025). Cette conception est particulièrement adaptée à notre étude, car vous avez combiné deux dispositifs complémentaires : un essai aqueux, où le contact avec les composés hydrosolubles est direct, et un essai en pots, où la poudre végétale agit par libération progressive dans un substrat sableux.

Les travaux récents replacent l'allélopathie dans les stratégies de protection agroécologique et de gestion intégrée des adventices. Les extraits, résidus, paillis, couverts végétaux et molécules naturelles sont explorés comme alternatives ou compléments aux herbicides de synthèse, en particulier dans un contexte de résistance aux herbicides, de réduction des intrants et de recherche de systèmes agricoles plus durables (Kostina-Bednarz et al., 2023 ; Pedrol et al., 2024 ; Schulz et Tabaglio, 2024 ; Xuan et al., 2025). Dans les agroécosystèmes oasiens, cette logique est particulièrement pertinente : la fragilité hydrique, la salinité, la proximité des cultures intercalaires et la sensibilité écologique des palmeraies imposent de rechercher des approches sélectives, localement disponibles et compatibles avec une gestion intégrée.

Le cas de *C. acutum* est intéressant parce que cette espèce, souvent perçue comme une liane spontanée ou envahissante, peut être reconsidérée comme une ressource bioactive. Les études phytochimiques récentes ont montré que *C. acutum* contient une diversité de métabolites secondaires, notamment flavonoïdes, coumarines, triterpènes, alcaloïdes et dérivés phénoliques. Une étude LC-ESI-TOF-MS/MS publiée en 2025 a signalé 46 composés dans l'extrait brut de *C. acutum*, avec la quercétine-3-O- β -galactoside comme composé majeur déjà rapporté chez l'espèce (Abdelhameed et al., 2025). D'autres travaux ont isolé des flavonoïdes tels que rutin, isoquercitrine, quercétine, kaempférol-3-O-glucoside, ainsi que la scopolétine, une coumarine bien connue pour ses effets biologiques (Abdelhameed et al., 2021). Ces données phytochimiques fournissent une base plausible aux effets observés sur les rhizomes de *C. dactylon* et *P. australis*.

Cependant, il est important de rester scientifiquement prudent : l'effet observé dans notre expérience ne peut pas encore être attribué à une molécule unique. Les poudres et extraits végétaux contiennent des cocktails complexes dans lesquels plusieurs familles chimiques peuvent agir de façon additive, synergique ou antagoniste. Les flavonoïdes peuvent intervenir dans l'équilibre redox et les interactions racinaires ; les coumarines peuvent perturber l'auxine, la division cellulaire et l'élongation ; les phénols peuvent modifier l'activité membranaire et enzymatique ; les saponines peuvent affecter les membranes ; les terpénoïdes peuvent agir sur la respiration et la stabilité cellulaire. Ainsi, le meilleur modèle explicatif actuel est celui d'une phytotoxicité plurimoléculaire affectant plusieurs cibles physiologiques simultanément. (Inderjit & Nilsen, 2003 ; Gniazdowska & Bogatek, 2005 ; Blum, 2011 ; Schulz & Tabaglio, 2024)

II.3.3. Modèle physiologique de la reprise végétative des rhizomes

La multiplication végétative par rhizomes et stolons repose sur une architecture modulaire. Chaque nœud représente une unité potentielle de régénération, car il peut porter un bourgeon, des primordia racinaires, des tissus méristématiques et des connexions vasculaires capables de relancer une nouvelle unité clonale. Les rhizomes et stolons ne sont donc pas de simples organes de réserve : ce sont des axes modifiés intégrant stockage, propagation, survie et occupation spatiale (Guo et al., 2021 ; Chen et Coughlan, 2026). Dans cette perspective, la baisse des émissions par fragment ou par nœud observée dans notre travail signifie que *C. acutum* affecte le potentiel fonctionnel des unités nodales elles-mêmes.

La reprise d'un fragment rhizomateux peut être décrite en plusieurs phases. La première phase correspond à la réhydratation et à la réactivation métabolique du fragment. La seconde implique la levée de dormance ou la réactivation des bourgeons nodaux. La troisième engage la rhizogenèse adventive, nécessaire à l'ancrage et à l'absorption hydrominérale. La quatrième correspond à l'émergence de la pousse, qui permet la restauration d'une surface photosynthétique. Enfin, la cinquième phase consiste en l'autonomisation du ramet, lorsque les organes néoformés deviennent suffisamment développés pour assurer la croissance indépendante. Nos résultats suggèrent que *C. acutum* intervient à plusieurs de ces niveaux : il réduit l'initiation, limite l'élongation et empêche l'établissement d'une réponse mixte racine-pousse. (de Kroon & van Groenendael, 1997 ; Klimešová & Klimeš, 2007 ; Xiong et al., 2024 ; Liu et al., 2025)

Les recherches récentes sur la formation des racines adventives montrent que ce processus est fortement contrôlé par l'auxine, mais aussi par les cytokinines, l'éthylène, l'ABA, les gibbérellines, les sucres, les ROS et l'état d'âge ou de compétence des tissus (Xiong et al., 2024 ; Liu et al., 2025). L'auxine est généralement considérée comme le signal central de l'induction racinaire, mais sa distribution spatiale, son transport polaire et son interaction avec les ROS déterminent la transition entre division, différenciation et élongation. Si les composés de *C. acutum* perturbent ces réseaux, ils peuvent empêcher la formation de racines adventives fonctionnelles même lorsque le fragment reste vivant.

La reprise végétative des pousses dépend d'un équilibre hormonal différent. Les bourgeons nodaux sont soumis à des signaux d'inhibition ou d'activation impliquant auxine, cytokinines, strigolactones, sucres, ABA et gibbérellines. La sortie de dormance exige une réorientation du métabolisme des réserves vers le bourgeon, une reprise mitotique et une croissance cellulaire coordonnée. Les travaux récents sur les rhizomes soulignent le rôle central des hormones dans la dormance et l'activation des bourgeons rhizomateux, ainsi que l'importance du métabolisme carboné dans la croissance clonale (Zhang et al., 2026 ; Chen et Coughlan, 2026). Cela explique pourquoi les émissions végétatives peuvent être plus sensibles que les émissions racinaires : elles nécessitent une organisation intégrée plus coûteuse et plus dépendante de signaux systémiques.

II.3.4. Hypothèse 1 : perturbation précoce de la rhizogenèse adventive

La première hypothèse physiologique est que les composés hydrosolubles et les métabolites libérés par les poudres de *C. acutum* perturbent la rhizogenèse adventive au niveau des nœuds. Cette hypothèse est soutenue par la baisse rapide des émissions racinaires dans l'essai aqueux, par la forte réduction des longueurs racinaires dans l'essai en pots et par l'effondrement des AUC racinaires aux fortes concentrations. Dans les modèles récents d'inhibition allélopathique des racines, les cibles les plus fréquemment discutées sont la division cellulaire du méristème, l'élongation des cellules de la zone subapicale, l'organisation de l'auxine, l'intégrité membranaire et l'équilibre oxydatif (Li et al., 2010 ; Staszek et al., 2021 ; Su et al., 2024 ; Wang et al., 2025).

Les racines jeunes constituent des bioindicateurs particulièrement sensibles parce que leur croissance repose sur un gradient très fin entre production de ROS, division cellulaire et élongation. Les ROS ne sont pas seulement des marqueurs de stress ; à faible niveau, elles participent normalement à la croissance racinaire. À concentration excessive ou mal localisée, elles provoquent peroxydation lipidique, oxydation protéique, altération des membranes et désorganisation de la paroi cellulaire. Les revues récentes sur le développement racinaire indiquent que la croissance normale exige une homéostasie redox étroitement contrôlée (Su et al., 2024). Les allelochimiques peuvent rompre cet équilibre, transformant les ROS de signaux développementaux en agents de stress.

Dans notre essai, l'inhibition des longueurs racinaires est parfois plus expressive que la réduction du nombre d'émissions. Cette différence est physiologiquement importante. Elle signifie que certains primordia ou jeunes organes peuvent être initiés, mais que leur élongation est rapidement freinée. Ce profil correspond à une atteinte de la zone d'élongation, de l'extensibilité pariétale, de la turgescence ou de l'activité des pompes membranaires. Les phénols, coumarines et flavonoïdes peuvent modifier le pH apoplastique, perturber les H⁺-ATPases, affecter les flux ioniques et limiter l'assouplissement de la paroi cellulaire nécessaire à l'allongement. Ainsi, une racine émise mais très courte ne constitue pas une reprise fonctionnelle : elle représente plutôt un début d'organogenèse avorté. (Blum, 1996 ; Li et al., 2010 ; Scavo & Mauromicale, 2021)

La présence possible de scopolétine et d'autres coumarines chez *C. acutum* renforce cette hypothèse. Des travaux récents sur la coumarine montrent que certains composés de cette famille peuvent inhiber la croissance racinaire en modulant l'auxine et la réponse redox (Liu et al., 2025). De même, des travaux expérimentaux antérieurs ont montré que des allelochimiques de type benzoxazinoïde ou phénolique peuvent modifier l'accumulation d'auxine, stimuler l'éthylène et provoquer une production de ROS associée à l'inhibition de l'élongation racinaire (Zhang et al., 2018). Bien que ces mécanismes n'aient pas été mesurés directement dans notre étude, ils fournissent des pistes explicatives très pertinentes pour interpréter les racines courtes, les émissions résiduelles et la diminution des AUC.

II.3.5. Hypothèse 2 : inhibition du débourrement nodal et rupture du programme racine-pousse

La deuxième hypothèse est que *C. acutum* perturbe le débourrement des bourgeons nodaux, c'est-à-dire la transition entre un nœud latent et une jeune pousse fonctionnelle. Cette hypothèse est fortement soutenue par la grande sensibilité des émissions végétatives. Dans les deux essais, les pousses sont souvent réduites avant que la rhizogenèse ne soit totalement supprimée. Cette hiérarchie suggère que le bourgeon aérien, ou la coordination entre bourgeon et racines adventives, constitue une cible majeure de l'effet allélopathique. (Klimešová & Klimeš, 2007 ; Zhang et al., 2026 ; Chen & Coughlan, 2026)

La levée de dormance d'un bourgeon nodal dépend d'un équilibre complexe entre cytokinines, auxine, sucres, strigolactones, ABA et gibbérellines. Les cytokinines favorisent généralement l'activation des bourgeons, alors que l'auxine apicale et les strigolactones peuvent contribuer à l'inhibition de la croissance latérale. Les sucres ne sont plus considérés seulement comme substrats énergétiques ; ils jouent aussi un rôle de signal d'activation des bourgeons. Dans un fragment isolé, la disponibilité en sucres issus des réserves rhizomateuses devient donc déterminante. Si les allelochimiques perturbent la respiration, la mobilisation de l'amidon, la circulation des assimilats ou la signalisation hormonale, le bourgeon peut rester latent ou mourir avant d'émettre une pousse visible. (Bouwmeester et al., 2007 ; Klimešová & Klimeš, 2007 ; Xiong et al., 2024 ; Liu et al., 2025)

Le passage d'une réponse mixte dans les témoins à une réponse racinaire seule sous traitement est particulièrement révélateur. Il indique que les fragments traités ne perdent pas immédiatement toute activité biologique ; ils entrent d'abord dans un état de survie minimale. La priorité physiologique semble être accordée à la racine, probablement parce qu'elle permettrait de rétablir l'absorption hydrominérale. En revanche, la pousse, plus exigeante en ressources et plus dépendante d'une activation méristématique coordonnée, est rapidement bloquée. Cette séquence correspond à un stress morphogénétique : le fragment reste partiellement vivant, mais ne parvient plus à reconstruire l'architecture complète d'un nouveau ramet. (de Kroon & van Groenendael, 1997 ; Guo et al., 2021)

Ce mécanisme est agronomiquement crucial. Pour contrôler une adventice rhizomateuse, il ne suffit pas de réduire quelques racines ; il faut empêcher le fragment de produire une pousse aérienne viable. Une pousse est indispensable pour restaurer la photosynthèse, alimenter les nouvelles racines, reconstituer les réserves et former de nouveaux stolons ou rhizomes. L'inhibition précoce des émissions végétatives observée dans notre étude compromet donc la dynamique de recolonisation clonale. Elle transforme le fragment en organe épuisable, incapable de renouveler son capital carboné. (Holm et al., 1977 ; Radosevich et al., 2007 ; Zimdahl, 2018)

II.3.6. Hypothèse 3 : stress oxydatif, membranes et respiration comme cibles transversales

La troisième hypothèse est celle d'un stress oxydatif transversal affectant simultanément racines, bourgeons et tissus d'élongation. Les allelochimiques sont fréquemment associés à une perturbation de l'homéostasie redox des plantes réceptrices. Les revues récentes soulignent que les ROS peuvent intervenir dans l'hormèse, l'autotoxicité et l'inhibition allélopathique, en agissant sur les membranes, les protéines, les parois, l'ADN et les voies de signalisation hormonale (Staszek et al., 2021 ; Su et al., 2024). Dans notre étude, l'effet simultané sur le nombre d'émissions et sur les longueurs est compatible avec un tel stress global.

Les membranes cellulaires constituent une cible probable. La peroxydation lipidique réduit la fluidité membranaire, altère les gradients ioniques et compromet l'activité des transporteurs. Or les jeunes racines et bourgeons ont besoin de gradients électrochimiques stables pour maintenir la turgescence, l'absorption ionique, le transport de sucres et la croissance cellulaire. Si les composés de *C. acutum* altèrent ces gradients, la plante réceptrice peut exprimer des racines courtes, des pousses avortées et une baisse rapide de la croissance totale. (Weir et al., 2004 ; Li et al., 2010 ; Staszek et al., 2021)

La respiration mitochondriale représente une autre cible plausible. La formation de racines adventives et l'activation des bourgeons exigent de l'ATP, des intermédiaires carbonés et une respiration active. Plusieurs allelochimiques naturels peuvent perturber la respiration, la chaîne de transport des électrons ou l'équilibre NADH/NAD⁺, entraînant une baisse de l'énergie disponible. Une telle perturbation expliquerait l'effet plus fort sur les émissions végétatives que sur les racines résiduelles : la pousse nécessite une organisation anatomique plus complexe, une expansion cellulaire plus longue et une dépense énergétique plus élevée. (Einhellig, 1995 ; Weir et al., 2004 ; Gniazdowska & Bogatek, 2005)

Il est également possible que les composés phénoliques provoquent une lignification précoce ou une rigidification des parois, ce qui limiterait l'élongation. Des travaux sur l'effet des composés phénoliques et d'autres allelochimiques ont montré que l'inhibition de la croissance peut être associée à la diminution de la division cellulaire, à la modification de l'ultrastructure cellulaire et à des altérations des tissus apicaux (Li et al., 2010 ; Rodríguez-Cerda et al., 2023). Dans notre expérience, les longueurs très faibles sous traitement suggèrent précisément une altération de l'élongation post-initiation.

II.3.7. Hypothèse 4 : mobilisation des réserves rhizomateuses et épuisement du fragment

La quatrième hypothèse concerne la mobilisation des réserves. Les rhizomes de graminées pérennes stockent des glucides non structuraux, des protéines, des minéraux et des composés de réserve qui permettent la reprise après coupe, enfouissement, sécheresse ou perturbation. Des travaux récents sur *Phragmites* montrent que la viabilité et la régénération dépendent fortement des réserves carbonées des rhizomes, et que des méthodes de gestion répétée peuvent réduire ces réserves et diminuer la viabilité des fragments (Bickford et al., 2024).

Chez *P. australis*, la réponse plus graduelle observée dans notre étude peut être interprétée à la lumière de cette richesse en réserves. Les fragments de *P. australis* semblent capables de maintenir une rhizogenèse résiduelle à faibles ou moyennes doses, ce qui suggère une plus grande autonomie initiale. Néanmoins, la forte inhibition des pousses montre que cette autonomie ne suffit pas à reconstruire un ramet complet. Le fragment peut survivre temporairement, mais son investissement aérien est empêché. Sans pousse, les réserves ne sont pas reconstituées ; elles peuvent donc s'épuiser progressivement. (Haslam, 1972 ; Mal & Narine, 2004 ; Bickford et al., 2024)

Chez *C. dactylon*, l'effondrement rapide des émissions sous fortes concentrations suggère une sensibilité plus immédiate des nœuds et des tissus méristématiques. Cette espèce est pourtant connue pour sa grande capacité de propagation par stolons et rhizomes. Le fait que *C. acutum* bloque cette capacité indique que l'effet ne porte pas sur une faiblesse écologique de *C. dactylon*, mais probablement sur une cible physiologique centrale : activation nodale, organisation hormonale, intégrité des méristèmes ou mobilisation des réserves. (Horowitz, 1972 ; Holm et al., 1977 ; Guo et al., 2021)

L'hypothèse d'un épuisement physiologique est particulièrement importante pour les perspectives de gestion. Si *C. acutum* empêche la formation de pousses tout en autorisant parfois quelques racines courtes, le fragment peut entrer dans une impasse énergétique : il consomme des réserves pour produire des organes non fonctionnels, sans retrouver la photosynthèse. Dans un système réel, cet effet pourrait être renforcé par un stress hydrique, une salinité modérée, un enfouissement ou une compétition. Inversement, il pourrait être atténué par un sol riche, une irrigation abondante ou une dégradation rapide des composés actifs. (Klimešová & Klimeš, 2007 ; Bickford et al., 2024)

II.3.8. Hypothèse 5 : spécificité feuilles versus plante entière

La comparaison entre poudre de feuilles et poudre de plante entière est l'un des aspects les plus intéressants de l'étude. Les feuilles semblent souvent plus radicales pour supprimer totalement les émissions, surtout à la dose T_5g. La plante entière reste fortement inhibitrice, mais elle peut laisser persister quelques réponses racinaires résiduelles. Cette différence peut être expliquée par la distribution organo-spécifique des métabolites secondaires. Les feuilles accumulent fréquemment des composés impliqués dans la défense, la photoprotection et les interactions biotiques, notamment

flavonoïdes, phénols, coumarines et dérivés terpéniques (Harborne, 1988 ; Wink, 2010 ; Patil et al., 2024).

Les travaux récents sur *C. acutum* renforcent cette interprétation. L'espèce contient des flavonoïdes biologiquement actifs, dont plusieurs dérivés de quercétine et de kaempférol, ainsi que la scopolétine (Abdelhameed et al., 2021 ; Abdelhameed et al., 2025). Or les flavonoïdes et coumarines peuvent interférer avec la croissance racinaire, l'auxine, les ROS et les interactions rhizosphériques. Une poudre foliaire concentrée peut donc représenter une matrice plus riche en composés rapidement lixiviables et directement actifs sur les nœuds.

La plante entière, au contraire, mélange feuilles, tiges, fruits éventuels et organes souterrains. Cette matrice peut diluer certains composés foliaires, mais aussi introduire d'autres molécules issues des tissus lignifiés, des rhizomes ou des tiges. Cela pourrait expliquer pourquoi la plante entière agit parfois fortement sur les longueurs, mais moins totalement sur l'initiation racinaire. En d'autres termes, la poudre de feuilles pourrait agir davantage sur l'initiation et le débourrement, tandis que la plante entière pourrait agir plus fortement sur l'élongation post-initiation. Cette hypothèse est cohérente avec nos observations, mais elle doit être testée par des analyses chimiques séparées des deux poudres. (Harborne, 1988 ; Wink, 2010 ; Patil et al., 2024)

Une autre hypothèse est liée à la vitesse de libération des composés. Les feuilles séchées et broyées peuvent libérer plus rapidement des molécules hydrosolubles ou semi-polaires, tandis que la plante entière, plus hétérogène, peut présenter une cinétique de décomposition différente. Dans le sable de dune, pauvre en matière organique et en colloïdes, la libération et la diffusion des composés peuvent être relativement directes. Cela peut accentuer les effets des feuilles, surtout à forte dose. (Inderjit & Nilsen, 2003 ; Narwal, 2004 ; Blum, 2011)

II3.9. Hypothèse 6 : différences de sensibilité entre *Cynodon dactylon* et *Phragmites australis*

Les deux espèces cibles partagent une forte capacité de reproduction végétative, mais elles ne répondent pas de façon identique. *C. dactylon* présente souvent un blocage rapide et sévère, alors que *P. australis* conserve davantage de réponses racinaires résiduelles aux doses faibles ou moyennes. Cette différence peut s'expliquer par la morphologie des propagules, la quantité de réserves, l'épaisseur des rhizomes, l'état de dormance des bourgeons, la tolérance au stress et la capacité à compartimenter ou détoxifier les composés. (Haslam, 1972 ; Holm et al., 1977 ; Čuda et al., 2021)

C. dactylon est une Poaceae vivace C4, très compétitive, propagée par stolons et rhizomes. Sa réussite repose sur la multiplication rapide de nœuds capables d'émettre racines et pousses. Les travaux sur les stolons et rhizomes montrent que ces axes horizontaux sont des structures spécialisées de propagation clonale, dont les nœuds permettent l'établissement de nouveaux individus (Guo et al., 2021). Dans notre étude, la suppression des émissions végétatives chez *C.*

dactylon est donc particulièrement significative : elle cible le cœur même de sa stratégie de colonisation.

P. australis possède des rhizomes plus robustes, souvent riches en réserves et capables de régénérer après fragmentation. Les données récentes du CABI Compendium rappellent que sa dispersion locale est principalement végétative, par croissance de rhizomes et de stolons formant de grandes masses clonales (CABI, 2024). Des expériences de régénération ont aussi montré que les fragments de *P. australis* peuvent produire de la biomasse racinaire et aérienne selon la partie du fragment, l'origine de population et les conditions d'enfouissement ou d'humidité (Čuda et al., 2021). Cette biologie explique probablement la persistance de réponses racinaires résiduelles dans nos traitements.

Cependant, la conservation d'une rhizogenèse partielle chez *P. australis* ne doit pas être interprétée comme une résistance totale. Les émissions végétatives et les longueurs sont fortement réduites, ce qui signifie que la plante ne parvient pas à convertir sa survie initiale en expansion clonale. Pour une espèce comme *P. australis*, dont la compétitivité dépend de la production rapide de tiges et de biomasse, l'inhibition de l'élongation et des pousses est très importante. Elle peut réduire l'accès à la lumière, limiter la reconstitution des réserves et empêcher la formation d'un réseau rhizomateux fonctionnel. (Mal & Narine, 2004 ; Hazelton et al., 2014 ; Bickford et al., 2024)

II.3.10. Effet dose, seuil physiologique et possible hormèse

Le profil dose-réponse est l'un des arguments les plus forts en faveur d'un effet allélopathique. Dans les deux essais, l'augmentation de la concentration ou de la dose s'accompagne d'une réduction progressive des émissions et des longueurs, avec des niveaux d'inhibition très élevés aux doses fortes. Ce gradient suggère une relation entre charge chimique et intensité de la perturbation physiologique. (Belz, 2007 ; Belz & Duke, 2014 ; Ritz et al., 2015)

Néanmoins, la réponse n'est pas toujours parfaitement linéaire. Dans certains cas, 75 % et 100 % dans l'essai aqueux ou T_{2,5g} et T_{5g} dans l'essai en pots peuvent présenter des réponses proches, voire quelques émissions résiduelles à la dose maximale. Ce type de réponse est fréquent en allélopathie. Il peut s'expliquer par l'hétérogénéité initiale des fragments, la variabilité de viabilité des nœuds, l'existence de seuils physiologiques, la saturation des sites d'action ou la présence de composés ayant des effets opposés. Les synthèses récentes insistent sur le fait que les allelochimiques peuvent être inhibiteurs à forte dose, neutres ou parfois stimulants à faible dose, selon le phénomène d'hormèse (Belz, 2007 ; Staszek et al., 2021 ; Patil et al., 2024 ; Wang et al., 2025).

Dans notre étude, la dose faible n'apparaît pas comme stimulante ; elle est déjà inhibitrice pour plusieurs variables, surtout les émissions végétatives. Cela suggère que le seuil de sensibilité des bourgeons nodaux est bas. En revanche, la persistance de quelques racines à dose faible ou moyenne peut refléter une tolérance partielle du compartiment racinaire, plutôt qu'un effet

stimulant. Cette nuance est importante : une racine courte et isolée n'est pas un signe de reprise normale, mais une réponse résiduelle sous contrainte. (Calabrese & Baldwin, 2003 ; Belz, 2007)

La notion de seuil physiologique est particulièrement pertinente pour la discussion agronomique. Chez *C. dactylon*, le seuil d'effondrement semble atteint plus rapidement, notamment dans l'essai aqueux à 75 % SM et dans l'essai en pots avec poudre foliaire à T_5g. Chez *P. australis*, le seuil d'inhibition totale semble plus élevé ou plus progressif, ce qui est cohérent avec la robustesse des rhizomes. Ces seuils devront être affinés par des doses intermédiaires et par des modèles dose-réponse adaptés aux variables de comptage et de longueur. (Quinn & Keough, 2002 ; Ritz et al., 2015)

II.3.11. Différence entre extrait aqueux et poudre : disponibilité chimique et interaction avec le substrat

La comparaison entre l'essai aqueux et l'essai en pots éclaire deux modes d'action complémentaires. L'extrait aqueux concentre les composés hydrosolubles immédiatement disponibles. Il simule partiellement le lessivage des tissus végétaux par l'eau d'irrigation ou la pluie. Son effet rapide sur les AUC et les émissions indique que les composés solubles de *C. acutum* sont capables d'agir directement sur les tissus nodaux. (Rice, 1984 ; Weston & Duke, 2003 ; Inderjit & Nilsen, 2003)

La poudre incorporée au sable représente une situation plus proche du sol. Dans ce cas, les composés sont libérés progressivement par humidification, diffusion, lixiviation et décomposition. Le sable de dune, préalablement rincé, constitue un substrat peu tamponné, pauvre en matière organique et en sites d'adsorption. Cette caractéristique peut favoriser la disponibilité des métabolites libérés, mais elle ne reproduit pas entièrement un sol de palmeraie, où argiles, matière organique, sels, microorganismes et cycles d'humidification peuvent modifier fortement la biodisponibilité des allelochimiques. (Blum, 2011 ; Pedrol et al., 2024)

Les revues récentes soulignent que la transition du laboratoire au champ est l'une des grandes difficultés de l'allélopathie appliquée. Les composés peuvent être adsorbés, oxydés, dégradés par les microorganismes, transformés en métabolites plus ou moins actifs, dilués par l'irrigation ou retenus par la matière organique (Schulz et Tabaglio, 2024 ; Xuan et al., 2025). Ainsi, nos résultats démontrent un potentiel biologique fort, mais ils doivent être prolongés par des essais sur sol réel, avec différentes textures, niveaux de salinité et conditions d'irrigation.

Il serait particulièrement intéressant de tester si l'effet de *C. acutum* est modifié par la salinité, car les palmeraies de Ouargla sont souvent soumises à des contraintes salines. La salinité peut modifier l'absorption d'eau, la sensibilité des méristèmes, l'équilibre ionique et le stress oxydatif. Une interaction entre stress salin et allélopathie pourrait amplifier l'inhibition des adventices, mais elle pourrait aussi augmenter le risque de phytotoxicité pour les cultures associées. (Le Houérou, 1995 ; Zuur et al., 2010 ; Schulz & Tabaglio, 2024)

II.3.12. Interprétation agroécologique pour les palmeraies de Ouargla

Dans les palmeraies sahariennes, *C. dactylon* et *P. australis* sont problématiques parce qu'elles combinent persistance clonale, compétition hydrique, occupation de l'espace, entrave aux opérations culturales et capacité de reprise après coupe ou fragmentation. La gestion de ces espèces est difficile, car les interventions mécaniques peuvent fragmenter les rhizomes et produire de nouvelles unités de propagation. Une stratégie réellement efficace doit donc réduire la viabilité des nœuds ou empêcher la transition fragment-racine-pousse. (Haslam, 1972 ; Holm et al., 1977 ; Toutain, 1979 ; Dubost, 2002)

Les résultats de notre étude suggèrent que *C. acutum* peut agir précisément sur cette transition. L'inhibition des émissions végétatives et la réduction des longueurs indiquent que les fragments traités perdent leur capacité à devenir des ramets fonctionnels. Cette propriété est intéressante pour concevoir des approches de gestion intégrée : application de poudre après arrachage ou fragmentation, incorporation localisée dans des zones fortement infestées, combinaison avec dessiccation, faux-semis, solarisation, paillage ou travail superficiel raisonné. (Radosevich et al., 2007 ; Chauhan, 2020 ; Scavo & Mauromicale, 2021)

Il ne faut toutefois pas conclure directement à une recommandation de terrain. Avant toute application agronomique, plusieurs validations sont nécessaires : effet sur le palmier dattier, effet sur les cultures intercalaires, impact sur la germination des plantes utiles, dynamique de décomposition, effet sur la microflore du sol, persistance des composés actifs et risque de phytotoxicité résiduelle. Les revues récentes rappellent que les approches allélopathiques doivent être standardisées, testées en conditions réalistes et intégrées dans des itinéraires techniques complets (Pedrol et al., 2024 ; Schulz et Tabaglio, 2024 ; Xuan et al., 2025).

Sur le plan de l'économie circulaire, *C. acutum* pourrait être valorisé comme biomasse locale bioactive, à condition que sa collecte ne favorise pas sa dissémination. La plante collectée dans les palmeraies pourrait être transformée en poudre ou extrait, puis évaluée comme matériau de suppression des adventices. Cette approche convertirait une espèce spontanée problématique en ressource potentielle. Toutefois, la faisabilité dépendra de la disponibilité de biomasse, du coût de séchage et broyage, de la stabilité des poudres, de la dose nécessaire et de la sécurité environnementale. (Khamare et al., 2022 ; Pedrol et al., 2024 ; Xuan et al., 2025)

II.3.13. Limites scientifiques et hypothèses à vérifier

La première limite est l'absence d'identification chimique directe des poudres et extraits utilisés dans notre essai. Les références sur *C. acutum* montrent une richesse en flavonoïdes, coumarines et autres métabolites, mais la composition exacte peut varier selon l'organe, le stade phénologique, la région, la saison et les conditions de séchage. Comme notre matériel a été collecté au stade de fructification dans les palmeraies de Ouargla, il serait nécessaire d'analyser spécifiquement les poudres de feuilles et de plante entière utilisées. (Reigosa et al., 1999 ; Abdelhameed et al., 2021 ; Abdelhameed et al., 2025)

La deuxième limite concerne la distinction entre allélopathie stricte et effets physico-chimiques du substrat. Une poudre végétale peut libérer des molécules bioactives, mais aussi modifier temporairement le pH, la conductivité, l'oxygénation, la rétention d'eau ou l'activité microbienne. Des contrôles complémentaires sont nécessaires : mesure du pH et de la conductivité des extraits, analyse des composés phénoliques totaux, dosage des flavonoïdes, test avec charbon actif pour adsorber certains composés organiques, comparaison entre poudre stérilisée et non stérilisée, et suivi microbiologique. (Inderjit & Nilsen, 2003 ; Blum, 2011 ; Duke, 2015)

La troisième limite concerne les mécanismes physiologiques. Les hypothèses proposées dans cette discussion doivent être testées par des marqueurs ciblés : teneur en MDA pour la peroxydation lipidique, H₂O₂ et O₂⁻ pour les ROS, activités SOD, CAT, APX et POD pour la réponse antioxydante, activité respiratoire, viabilité cellulaire par coloration TTC, observation histologique des nœuds, dosage des sucres solubles et de l'amidon dans les rhizomes, et éventuellement dosage hormonal de l'IAA, ABA, cytokinines et gibbérellines. (Weir et al., 2004 ; Staszek et al., 2021 ; Su et al., 2024)

La quatrième limite concerne l'échelle temporelle. Vingt-et-un jours suffisent pour observer la reprise initiale, mais pas nécessairement pour distinguer mortalité définitive, dormance prolongée ou reprise tardive. Il serait utile de prolonger certains essais jusqu'à 35 ou 45 jours, puis de transférer les fragments traités dans un substrat sain pour tester leur capacité de récupération. Si les fragments restent incapables de reprendre après transfert, l'effet serait davantage létal ou irréversible. S'ils reprennent, l'effet serait plutôt inhibiteur temporaire ou retardateur. (Ranal & Santana, 2006 ; Čuda et al., 2021 ; Bickford et al., 2024)

La cinquième limite est l'absence de modèle dose-réponse formel. Les résultats actuels démontrent l'inhibition, mais il serait intéressant d'estimer des doses efficaces : DE50 pour l'émission totale, DE90 pour la suppression végétative, concentration seuil pour absence de pousse, et paramètres de pente. Ces modèles permettraient de comparer quantitativement les deux espèces et les deux matrices de *C. acutum*. (Finney, 1971 ; Ritz et al., 2015)

II.3.14. Modèle intégrateur proposé

À partir des résultats et de la littérature récente, on peut proposer le modèle suivant. Les poudres et extraits de *C. acutum* libèrent un cocktail de métabolites hydrosolubles et semi-polaires, comprenant probablement flavonoïdes, composés phénoliques, coumarines et autres métabolites spécialisés. Ces composés entrent en contact avec les nœuds des fragments rhizomateux. À faible dose, ils perturbent d'abord la coordination hormonale et redox des bourgeons, ce qui réduit les émissions végétatives. Les racines peuvent encore apparaître, mais leur longueur est réduite et leur fonctionnalité limitée. (Weir et al., 2004 ; Li et al., 2010 ; Schulz & Tabaglio, 2024 ; Abdelhameed et al., 2025)

À dose intermédiaire, la rhizogenèse est fortement affectée. Les primordia racinaires et les zones d'élongation deviennent moins actifs ; les pousses sont généralement supprimées. Le fragment entre dans un état de survie incomplète, caractérisé par quelques racines résiduelles mais sans véritable ramet. À forte dose, les méristèmes nodaux, la division cellulaire, l'élongation et la mobilisation des réserves sont suffisamment perturbés pour provoquer une extinction morphogénétique : absence d'émission ou organes très courts et non fonctionnels. (Blum, 1996 ; Xiong et al., 2024 ; Liu et al., 2025)

Ce modèle explique aussi les différences entre espèces. *C. dactylon*, malgré sa forte plasticité, possède des propagules plus sensibles à l'interruption rapide du couplage nœud-racine-pousse ; *P. australis*, plus riche en réserves et plus robuste, maintient parfois une rhizogenèse résiduelle, mais échoue à produire une croissance aérienne suffisante. Il explique enfin la différence feuilles/plante entière : les feuilles pourraient libérer plus rapidement des composés actifs sur l'initiation, tandis que la plante entière pourrait fournir un mélange plus hétérogène affectant fortement l'élongation. (Haslam, 1972 ; Holm et al., 1977 ; Mal & Narine, 2004 ; Guo et al., 2021)

La valeur scientifique de cette étude est donc double. D'une part, elle démontre un potentiel allélopathique fort de *C. acutum* contre deux adventices rhizomateuses majeures. D'autre part, elle ouvre un champ de recherche physiologique sur la vulnérabilité des propagules végétatives aux métabolites spécialisés. Dans le contexte des palmeraies sahariennes, cette approche est originale, car elle vise la multiplication végétative, étape clé de la persistance des adventices pérennes. (Scavo & Mauromicale, 2021 ; Kostina-Bednarz et al., 2023 ; Pedrol et al., 2024)

II.3.15. Perspectives expérimentales prioritaires

Pour consolider les hypothèses proposées, les perspectives suivantes sont prioritaires :

- réaliser un profilage LC-MS/MS et HPLC des poudres de feuilles et de plante entière de *C. acutum* collectées à Ouargla ; (Abdelhameed et al., 2021 ; Abdelhameed et al., 2025)
- doser les phénols totaux, flavonoïdes, coumarines, saponines et alcaloïdes dans chaque matrice ;
- mesurer le pH, la conductivité électrique et l'osmolarité des solutions aqueuses afin de séparer effet allélopathique et effet physico-chimique ; (Inderjit & Nilsen, 2003 ; Blum, 2011)
- tester l'effet du charbon actif dans le substrat pour vérifier la contribution de composés organiques adsorbables ; (Inderjit & Callaway, 2003 ; Blum, 2011)
- suivre les marqueurs de stress oxydatif dans les fragments traités : MDA, H₂O₂, SOD, CAT, APX, POD ;
- réaliser des coupes histologiques des nœuds pour observer l'état des bourgeons, primordia racinaires et tissus méristématiques ; (Klimešová & Klimeš, 2007 ; Xiong et al., 2024)
- doser les sucres solubles et l'amidon des rhizomes avant et après traitement ;

- comparer la réponse des fragments à 21, 35 et 45 jours, puis tester leur capacité de récupération dans un substrat non traité ; (Ranal & Santana, 2006 ; Čuda et al., 2021)
- tester la sélectivité sur palmier dattier, cultures intercalaires et espèces fourragères utiles ;
- passer progressivement à des essais sur sol réel de palmeraie, avec différentes humidités, salinités et doses de poudre. (Inderjit & Nilsen, 2003 ; Duke, 2015 ; Xuan et al., 2025)

La discussion intégrée des deux essais montre que *C. acutum* exerce une inhibition profonde de la multiplication végétative de *C. dactylon* et de *P. australis*. Cette inhibition ne se limite pas à une réduction quantitative des organes néoformés ; elle traduit une perturbation globale du programme de régénération clonale. Les traitements affectent la rhizogenèse, la néoformation végétative, l'élongation des organes, la réponse totale et la dynamique cumulative de reprise. Les émissions végétatives apparaissent comme le compartiment le plus sensible, tandis que la rhizogenèse peut persister temporairement, surtout chez *P. australis*, mais sans permettre une reprise fonctionnelle complète. (Weir et al., 2004 ; Li et al., 2010 ; Schulz & Tabaglio, 2024)

Les hypothèses physiologiques les plus plausibles impliquent une combinaison de mécanismes : perturbation de l'auxine et des cytokinines, déséquilibre redox, stress oxydatif, altération membranaire, inhibition de la division et de l'élongation cellulaire, modification de la mobilisation des réserves rhizomateuses et rupture du couplage fonctionnel entre racines adventives et pousses. La richesse phytochimique connue de *C. acutum*, notamment en flavonoïdes et coumarines, soutient fortement cette interprétation, même si l'identification directe des composés actifs reste nécessaire. (Einhellig, 1995 ; Gniazdowska & Bogatek, 2005 ; Staszek et al., 2021 ; Su et al., 2024)

Sur le plan agronomique, ces résultats suggèrent que *C. acutum* pourrait constituer une source locale de substances ou de biomasses à potentiel bioherbicide contre des adventices rhizomateuses très difficiles à gérer. Toutefois, le passage du bioessai à l'application en palmeraie impose des validations supplémentaires : composition chimique, sélectivité, persistance, interaction avec le sol, effet sur la microflore et innocuité pour les cultures. L'intérêt majeur de ce travail est d'ouvrir une voie de recherche originale centrée non pas sur la germination, mais sur la vulnérabilité physiologique des propagules végétatives, qui représentent le véritable réservoir de persistance de *C. dactylon* et *P. australis* dans les palmeraies sahariennes. (Jabran et al., 2015 ; Scavo & Mauromicale, 2021 ; Khamare et al., 2022 ; Xuan et al., 2025)

Conclusion et recommandations

Conclusion

Au terme de cette étude, les résultats obtenus mettent en évidence un effet inhibiteur net de la poudre et/ou des extraits aqueux de *C. acutum* sur la reprise végétative de deux espèces adventices rhizomateuses majeures des agroécosystèmes oasiens, *C. dactylon* et *P. australis*. L'ensemble des observations réalisées en conditions contrôlées et semi-contrôlées indique que les traitements appliqués réduisent significativement les émissions racinaires, les émissions végétatives, les émissions totales ainsi que les longueurs des organes néoformés. Cette réponse traduit une perturbation profonde des processus de régénération à partir des nœuds, qui constituent le principal point de relance morphogénétique chez ces espèces vivaces.

L'effet observé est fortement dose-dépendant. Les traitements les plus concentrés, notamment 5g, se distinguent par une inhibition quasi totale de la rhizogenèse et de la caulogenèse, alors que les doses intermédiaires conservent une activité partielle mais déjà biologiquement significative. Cette gradation confirme que le matériel végétal de *C. acutum* renferme des composés bioactifs capables d'interférer avec les mécanismes physiologiques impliqués dans la mobilisation des réserves, la division cellulaire, l'élongation et l'organisation des tissus adventifs. Les différences observées entre feuilles et plante entière suggèrent également que la nature de l'organe utilisé influence l'intensité de la réponse, probablement en relation avec la distribution différentielle des métabolites secondaires.

Sur le plan biologique, les résultats sont particulièrement importants car ils concernent deux adventices difficiles à maîtriser par les méthodes classiques. Leur persistance repose sur des organes souterrains puissants, riches en réserves et capables de régénérer rapidement de nouveaux axes végétatifs après perturbation mécanique. La réduction simultanée des racines et des pousses constitue donc un signal agronomique fort : le traitement n'agit pas seulement sur la croissance visible, mais affecte la capacité même de reconstitution du système clonal. Cette action sur la multiplication végétative représente un levier prometteur pour limiter la recolonisation des parcelles, surtout dans les palmeraies et les systèmes irrigués sahariens où le désherbage mécanique peut favoriser la fragmentation et la dissémination des rhizomes.

D'un point de vue statistique, les tests non paramétriques appliqués aux variables de croissance confirment l'existence de différences hautement significatives entre le témoin et les traitements. Les tailles d'effet élevées renforcent la portée biologique des résultats et montrent que les différences ne relèvent pas uniquement d'une significativité formelle, mais correspondent à une modification réelle du comportement morphogénétique des espèces cibles. Les corrélations positives entre émissions racinaires et végétatives montrent, par ailleurs, que la reprise des deux compartiments demeure fonctionnellement liée : lorsque l'émission racinaire est freinée, l'expression végétative tend également à diminuer, ce qui souligne le caractère intégré de la réponse.

Ainsi, cette étude apporte une contribution originale à la valorisation biotechnologique des ressources végétales spontanées sahariennes. Elle montre que *C. acutum*, longtemps considéré

comme une plante envahissante ou peu valorisée, peut devenir une source potentielle de molécules ou de formulations naturelles à intérêt phytosanitaire. Les résultats obtenus ouvrent la voie au développement de solutions de biocontrôle d'origine végétale, compatibles avec les objectifs actuels de réduction de la dépendance aux herbicides de synthèse et d'intégration de méthodes alternatives dans la gestion durable des adventices vivaces.

Recommandations

À partir des résultats obtenus et des exigences actuelles de la protection intégrée des cultures, les recommandations suivantes peuvent être proposées :

- Valider les effets observés par des essais au champ en conditions oasiennes réelles, en tenant compte de la texture du sol, de la salinité, de l'humidité, de la température et de la dynamique naturelle des rhizomes.
- Élargir la gamme de doses testées afin d'établir des courbes dose-réponse précises et de déterminer les doses minimales efficaces, les doses optimales et les seuils de phytotoxicité éventuelle.
- Comparer séparément les organes de *C. acutum* (feuilles, tiges, racines, plante entière) afin d'identifier les fractions végétales les plus actives et les plus intéressantes pour une valorisation agronomique.
- Réaliser un fractionnement bio-guidé des extraits et une caractérisation phytochimique avancée par chromatographie et spectrométrie de masse, dans le but d'identifier les métabolites responsables de l'activité inhibitrice.
- Tester la sélectivité des traitements sur des espèces cultivées représentatives des systèmes sahariens, notamment palmier dattier, cultures maraîchères et plantes fourragères, afin d'écarter tout risque agronomique.
- Évaluer les effets des résidus de *C. acutum* sur la microflore du sol, la germination des plantes non cibles, les organismes utiles et la dynamique de la matière organique.
- Étudier différentes formes d'application : poudre sèche, extrait aqueux, macérat, formulation granulée, incorporation au sol ou application localisée sur zones infestées.
- Intégrer cette approche dans des stratégies combinées associant paillage, solarisation, arrachage raisonné, gestion de l'irrigation, rotation culturale et surveillance précoce des repousses.
- Mettre en place un suivi temporel plus long pour vérifier si l'inhibition observée est temporaire ou durable, et pour mesurer la capacité de récupération des rhizomes après arrêt du traitement.
- Développer, à terme, un prototype de bioherbicide ou d'amendement phytosanitaire naturel, adapté aux contraintes techniques, économiques et environnementales des exploitations sahariennes.

En définitive, cette recherche doit être considérée comme une étape fondatrice vers une biotechnologie végétale appliquée à la protection des cultures, fondée sur l'exploitation raisonnée des potentialités allélopathiques de la flore saharienne.

***Références
bibliographiques***

Références bibliographiques

- Abdelhameed, R. F. A., Ibrahim, A. K., Yamada, K., et al. (2021).** *Antioxidant and anti-inflammatory activity of Cynanchum acutum L. isolated flavonoids using experimentally induced type 2 diabetes mellitus: biological and in silico investigation.* Molecules, 26, 5844.
- Abdelhameed, R. F. A., Ibrahim, A. K., Darwish, K. M., Atta, A. M., Shabayek, S., Idriss, M. T., Ibrahim, A. K., Ahmed, S. A., Badr, J. M., Nashawi, A. A., Murshid, S. S. A., Lashkar, M. O., Elhady, S. S., & Habib, E. S. (2025).** *Phytochemical and antiviral investigation of Cynanchum acutum L. extract and derived semi-synthetic analogs targeting SARS-CoV-2 main protease.* Future Journal of Pharmaceutical Sciences, 11, article 907.
- Abu Ziada, M. E., Al Kraeshi, N. K., & Alshami, M. (2016).** *Ecological studies on wild medicinal plants in Egypt. III. Cynanchum acutum L.* Journal of Plant Production, 7(1), 53–60.
- Abu Ziada, M. E., et al. (2016).** *Cynanchum acutum L.: Ecological survey, biological aspects, bioactive metabolites and antimicrobial activity.* Journal of Plant Production, 7, 1027-1036.
- Aidoud, A. (1997).** *Fonctionnement des écosystèmes méditerranéens arides et semi-arides.* Sécheresse, 8, 115-121.
- Ailstock, M. S., Norman, C. M., & Bushmann, P. J. (2001).** *Common reed Phragmites australis: control and effects upon biodiversity in freshwater nontidal wetlands.* Restoration Ecology, 9, 49-59.
- Ain, Q., Mushtaq, W., Shad, R. A., et al. (2023).** *Allelopathy-based weed management in sustainable agriculture: recent advances and future prospects.* Plants / Agronomy-related literature.
- Ain, Q., Mushtaq, W., Shadab, M., et al. (2023).** *Allelopathy: An alternative tool for sustainable agriculture.* Plant Growth Regulation, 100, 1-22.
- Albert, A., Brisson, J., Belzile, F., Turgeon, J., & Lavoie, C. (2015).** *Strategies for a successful plant invasion: the reproduction of Phragmites australis in North America.* Journal of Ecology, 103, 1529-1537.
- Aldrich, R.J., & Kremer, R.J. (1997).** *Principles in Weed Management.* Iowa State University Press.
- Ali, H. H., Tanveer, A., Nadeem, M. A., & Javaid, M. M. (2020).** *Allelopathy and crop residues in weed management.* Allelopathy Journal, 50, 1-22.
- Aliotta, G., Cafiero, G., Fiorentino, A., & Monaco, P. (1993).** *Potential allelochemicals from Cynanchum acutum.* Phytochemistry, 32, 965-968.

- Ammar, E. E., Aioub, A. A. A., Elesawy, A. E., Karkour, A. M., Mouhamed, M. S., Amer, A. A., & EL-Shershaby, N. A. (2023).** *Insightful review of bioherbicides derived from natural compounds for sustainable weed management.* Journal of the Chilean Chemical Society, 68(2), 5847–5858.
- An, M., Pratley, J. E., & Haig, T. (1998).** *Allelopathy: from concept to reality.* Environmental and Analytical Botany, 39, 107-117.
- Bais, H.P., Vepachedu, R., Gilroy, S., Callaway, R.M., & Vivanco, J.M. (2003).** *Allelopathy and exotic plant invasion: from molecules and genes to species interactions.* Science, 301, 1377-1380.
- Bajwa, A. A. (2014).** *Sustainable weed management in conservation agriculture.* Crop Protection, 65, 105-113.
- Bar, O., et al. (2024).** *Biology and chemical weed management of Cynanchum acutum.* Frontiers in Agronomy, 6, 1448556.
- Baskin, C.C., & Baskin, J.M. (2014).** *Seeds: Ecology, Biogeography, and Evolution of Dormancy and Germination.* Academic Press.
- Batish, D. R., Singh, H. P., Kaur, S., Kohli, R. K., & Yadav, S. S. (2007).** *Caffeic acid affects early growth and morphogenesis of mung bean.* Plant Growth Regulation, 53, 37-44.
- Batish, D. R., Singh, H. P., Kohli, R. K., & Kaur, S. (2007).** *Crop allelopathy and its role in ecological agriculture.* Journal of Crop Production, 4, 121-161.
- Batish, D.R., Lavanya, K., Singh, H.P., & Kohli, R.K. (2007).** *Root-mediated allelopathic interference of Nicotiana plumbaginifolia.* Plant and Soil, 293, 255-262.
- Batish, D. R., Singh, H. P., Kohli, R. K., & Kaur, S. (2008).** *Eucalyptus essential oil as a natural pesticide.* Forest Ecology and Management, 256, 2166-2174.
- Belz, R. G. (2007).** *Allelopathy in crop/weed interactions: an update.* Pest Management Science, 63, 308-326.
- Belz, R. G., & Duke, S. O. (2014).** *Herbicides and plant hormesis.* Pest Management Science, 70, 698-707.
- Benhouhou, S. (2005).** *A brief overview on the historical background of Algerian floristic studies.* Bocconeia, 16, 123-128.
- Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995).** *Controlling the false discovery rate.* Journal of the Royal Statistical Society B, 57, 289-300.
- Bewley, J. D., Bradford, K. J., Hilhorst, H. W. M., & Nonogaki, H. (2013).** *Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy.* 3e ed. New York: Springer.
- Bhowmik, P. C., & Inderjit. (2003).** *Challenges and opportunities in implementing allelopathy for natural weed management.* Crop Protection, 22, 661-671.

- Bickford, W. A., et al. (2024).** *Multi-year cut-to-drown management limits Phragmites australis growth by depleting belowground carbohydrate reserves.* Wetlands Ecology and Management / USGS report.
- Blum, U. (1996).** *Allelopathic interactions involving phenolic acids.* Journal of Nematology, 28, 259-267.
- Blum, U. (1998).** *Effects of microbial utilization of phenolic acids and their phenolic acid breakdown products on allelopathic interactions.* Journal of Chemical Ecology, 24, 685-708.
- Blum, U. (2011).** *Plant-Plant Allelopathic Interactions: Phenolic Acids, Cover Crops and Weed Emergence.* Dordrecht: Springer.
- Bond, W., & Grundy, A. C. (2001).** *Non-chemical weed management in organic farming systems.* Weed Research, 41, 383-405.
- Bouwmeester, H. J., Roux, C., Lopez-Raez, J. A., & Becard, G. (2007).** *Rhizosphere communication of plants, parasitic plants and AM fungi.* Trends in Plant Science, 12, 224-230.
- Box, G. E. P., Hunter, J. S., & Hunter, W. G. (2005).** *Statistics for Experimenters.* 2e ed. Hoboken: Wiley.
- CABI. (2024).** Phragmites australis (common reed). CABI Compendium. CAB International.
- Calabrese, E. J., & Baldwin, L. A. (2003).** *Hormesis: the dose-response revolution.* Annual Review of Pharmacology and Toxicology, 43, 175-197.
- Callaway, R. M., & Aschehoug, E. T. (2000).** *Invasive plants versus their new and old neighbors: A mechanism for exotic invasion.* Science, 290, 521-523.
- Chambers, R. M., Meyerson, L. A., & Saltonstall, K. (1999).** *Expansion of Phragmites australis into tidal wetlands of North America.* Aquatic Botany, 64, 261-273.
- Chauhan, B. S. (2020).** *Grand challenges in weed management.* Frontiers in Agronomy, 1, 3.
- Cheema, Z. A., Farooq, M., & Wahid, A. (2013).** *Allelopathy: Current Trends and Future Applications.* Springer.
- Chen, H., & Coughlan, J. M. (2026).** *The genetic and developmental enigma of rhizomes: crucial traits with limited understanding.* Preprint / plant developmental biology literature.
- Cheng, F., & Cheng, Z. (2015).** *Research progress on plant allelopathy in agriculture.* Frontiers in Plant Science, 6, 1020.
- Cheng, F., & Cheng, Z. (2015).** *Research progress on the use of plant allelopathy in agriculture and the physiological and ecological mechanisms of allelopathy.* Frontiers in Plant Science, 6, 1020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01020>.
- Chon, S.U., Jang, H.G., Kim, D.K., Kim, Y.M., Boo, H.O., & Kim, Y.J. (2005).** *Allelopathic potential in lettuce seedlings.* Scientia Horticulturae, 106, 309-317.

- Chou, C. H. (1999).** *Roles of allelopathy in plant biodiversity and sustainable agriculture*. Critical Reviews in Plant Sciences, 18, 609-636.
- Chou, C. H. (2006).** *Introduction to allelopathy*. In M. J. Reigosa, N. Pedrol & L. Gonzalez (Eds.), *Allelopathy: A Physiological Process with Ecological Implications*. Dordrecht: Springer.
- Cordeau, S., Triolet, M., Wayman, S., Steinberg, C., & Guillemin, J. P. (2016).** *Bioherbicides: Dead in the water? A review of the existing products for integrated weed management*. Crop Protection, 87, 44–49.
- Cousens, R., & Mortimer, M. (1995).** *Dynamics of Weed Populations*. Cambridge University Press.
- Crawley, M. J. (2013).** *The R Book*. 2e ed. Chichester: Wiley.
- Čuda, J., Skálová, H., Meyerson, L. A., & Pyšek, P. (2021).** *Regeneration of Phragmites australis from rhizome and culm fragments: an experimental test of environmental effects, population origin and invasion status*. Preslia, 93, 145-165.
- Cudney, D. W., Elmore, C. L., & Bell, C. E. (1997).** *Bermudagrass control in California cropping systems*. University of California Division of Agriculture and Natural Resources.
- Dayan, F. E., Cantrell, C. L., & Duke, S. O. (2009).** *Natural products in crop protection*. Bioorganic & Medicinal Chemistry, 17, 4022-4034.
- Dayan, F. E., Duke, S. O., & Grossmann, K. (2010).** *Herbicides as probes in plant biology*. Weed Science, 58, 340-350.
- Dayan, F. E., & Duke, S. O. (2014).** *Natural compounds as next-generation herbicides*. Plant Physiology, 166, 1090–1105.
- De Kroon, H., & van Groenendaal, J. (1997).** *The Ecology and Evolution of Clonal Plants*. Backhuys Publishers.
- Dolianitis, B. M., Frescura, V. D. S., Furtado, G. F., Tres, M. V., & Zabet, G. L. (2025).** *Plant-based bioherbicides: Review of eco-friendly strategies for weed control in organic bean and corn farming*. AgriEngineering, 7, 288. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7090288>.
- Dong, M., de Kroon, H., & Werger, M. J. A. (1996).** *Morphological responses to nutrient availability in clonal plants*. Vegetatio, 123, 201-213.
- Dubost, D. (2002).** *Écologie, aménagement et développement agricole des oasis algériennes*. Alger: Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides.
- Duke, S. O., Dayan, F. E., Rimando, A. M., et al. (2000).** *Chemicals from nature for weed management*. Weed Science, 48, 138-151.
- Duke, S. O., Dayan, F. E., Romagni, J. G., & Rimando, A. M. (2000).** *Natural products as sources of herbicides: Current status and future trends*. Weed Research, 40, 99–111.

- Duke, S.O., Cedergreen, N., Velini, E.D., & Belz, R.G. (2006).** *Hormesis: is it an important factor in herbicide use and allelopathy? Outlooks on Pest Management*, 17, 29-33.
- Duke, S. O. (2015).** *Proving allelopathy in crop-weed interactions*. *Weed Science*, 63, 121-132.
- Duke, S. O. (2022).** *The potential future roles of natural compounds and microbial bioherbicides in weed management in crops*. *Advances in Weed Science*, 40, e020220051.
- Dunn, O. J. (1964).** *Multiple comparisons using rank sums*. *Technometrics*, 6, 241-252.
- Einhellig, F. A. (1995).** *Allelopathy: current status and future goals*. In Inderjit, K. M. M. Dakshini & F. A. Einhellig (Eds.), *Allelopathy: Organisms, Processes, and Applications*. Washington, DC: ACS.
- Einhellig, F. A. (1995).** *Mechanism of action of allelochemicals in allelopathy*. In Inderjit, K. M. M. Dakshini, & F. A. Einhellig (Eds.), *Allelopathy: Organisms, processes, and applications* (pp. 96–116). ACS Symposium Series.
- Einhellig, F. A. (1996).** *Interactions involving allelopathy in cropping systems*. *Agronomy Journal*, 88, 886-893.
- Farooq, M., Jabran, K., Cheema, Z. A., Wahid, A., & Siddique, K. H. M. (2011).** *The role of allelopathy in agricultural pest management*. *Pest Management Science*, 67, 493-506.
- Ferguson, J. J., & Rathinasabapathi, B. (2003).** *Allelopathy: how plants suppress other plants*. University of Florida IFAS Extension.
- Ferry, M., Greiner, D., & Bedrani, S. (1998).** *Le palmier dattier dans l'agriculture d'oasis*. Options Méditerranéennes, Série A.
- Finney, D. J. (1971).** *Probit Analysis (3rd ed.)*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Fitter, A. H., & Hay, R. K. M. (2002).** *Environmental physiology of plants (3rd ed.)*. Academic Press.
- Ghahreman, A. (1979).** *Flora of Iran*. Tehran: Research Institute of Forests and Rangelands.
- Gniazdowska, A., & Bogatek, R. (2005).** *Allelopathic interactions between plants: multi-site action of allelochemicals*. *Acta Physiologiae Plantarum*, 27, 395-407.
- Gotelli, N. J., & Ellison, A. M. (2013).** *A Primer of Ecological Statistics*. 2e ed. Sunderland: Sinauer.
- Grace, J. B. (1989).** *Effects of water depth on Typha latifolia and Typha domingensis*. *American Journal of Botany*, 76, 762-768.
- Grime, J. P. (2001).** *Plant strategies, vegetation processes, and ecosystem properties (2nd ed.)*. Wiley.
- Guo, L., Plunkert, M., Luo, X., & Liu, Z. (2021).** *Developmental regulation of stolon and rhizome*. *Current Opinion in Plant Biology*, 59, 101970.
- Harborne, J. B. (1988).** *Introduction to Ecological Biochemistry*. Academic Press.

- Harborne, J.B. (1993).** *Introduction to Ecological Biochemistry*. Academic Press.
- Harborne, J. B. (1998).** *Phytochemical methods: A guide to modern techniques of plant analysis* (3rd ed.). Chapman & Hall.
- Harper, J. L. (1977).** *Population Biology of Plants*. Academic Press.
- Hasan, M., Ahmad-Hamdani, M. S., Rosli, A. M., & Hamdan, H. (2021).** *Bioherbicides: An eco-friendly tool for sustainable weed management*. *Plants*, 10, 1212. <https://doi.org/10.3390/plants10061212>.
- Haslam, S. M. (1972).** *Biological flora of the British Isles: Phragmites communis Trin.* *Journal of Ecology*, 60, 585-610.
- Haslam, S. M. (1973).** *Some aspects of the life history and autecology of Phragmites communis Trin.* *Annals of Botany*, 37, 495-502.
- Hatcher, P. E., & Melander, B. (2003).** *Combining physical, cultural and biological methods: prospects for integrated non-chemical weed management*. *Weed Research*, 43, 303-322.
- Hazelton, E. L. G., Mozdzer, T. J., Burdick, D. M., Kettenring, K. M., & Whigham, D. F. (2014).** *Phragmites australis management in the United States: 40 years of methods and outcomes*. *AoB Plants*, 6, plu001.
- Heap, I. (2014).** *Global perspective of herbicide-resistant weeds*. *Pest Management Science*, 70, 1306-1315.
- Hierro, J.L., & Callaway, R.M. (2003).** *Allelopathy and exotic plant invasion*. *Plant and Soil*, 256, 29-39.
- Holm, L. G., Plucknett, D. L., Pancho, J. V., & Herberger, J. P. (1977).** *The World's Worst Weeds: Distribution and Biology*. University Press of Hawaii.
- Holm, L. G., Doll, J., Holm, E., Pancho, J., & Herberger, J. (1997).** *World Weeds: Natural Histories and Distribution*. New York: Wiley.
- Hopkins, W. G., & Hüner, N. P. A. (2009).** *Introduction to Plant Physiology*. 4th ed. Wiley.
- Horowitz, M. (1972).** *Growth, tuber formation and spread of Cynodon dactylon*. *Weed Research*, 12, 207-220.
- Horowitz, M. (1973).** *Spatial growth of Cynodon dactylon*. *Weed Research*, 13, 107-113.
- Horowitz, M. (1996).** *Bermudagrass (Cynodon dactylon): biology and management*. *Weed Technology*, 10, 548-561.
- Hussain, F., et al. (2011).** *Allelopathic potential of Cynanchum acutum and associated weeds*. *Journal of Medicinal Plants Research*, 5, 594-600.
- Inderjit, Dakshini, K. M. M., & Foy, C. L. (Eds.). (1999).** *Principles and Practices in Plant Ecology: Allelochemical Interactions*. CRC Press.

- Inderjit, & Callaway, R. M. (2003).** *Experimental designs for the study of allelopathy*. Plant and Soil, 256, 1-11.
- Inderjit, & Duke, S. O. (2003).** *Ecophysiological aspects of allelopathy*. Planta, 217, 529-539.
- Inderjit, & Nilsen, E. T. (2003).** *Bioassays and field studies for allelopathy in terrestrial plants: progress and problems*. Critical Reviews in Plant Sciences, 22, 221-238.
- Inderjit, Wardle, D. A., Karban, R., & Callaway, R. M. (2011).** *The ecosystem and evolutionary contexts of allelopathy*. Trends in Ecology & Evolution, 26, 655-662.
- Islam, A. K. M. M., Karim, S. M. R., Kheya, S. A., & Yeasmin, S. (2024).** *Unlocking the potential of bioherbicides for sustainable and environment friendly weed management*. Heliyon, 10, e36088. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36088>.
- Isman, M. B. (2020).** *Botanical insecticides in the twenty-first century: Fulfilling their promise?* Annual Review of Entomology, 65, 233–249.
- ISTA. (2023).** *International Rules for Seed Testing*. Bassersdorf: International Seed Testing Association.
- Jabran, K., Mahajan, G., Sardana, V., & Chauhan, B. S. (2015).** *Allelopathy for weed control in agricultural systems*. Crop Protection, 72, 57-65.
- Kadhim, M. J., & Saadedin, S. M. K. (2024).** *Phytochemical analysis of Cynanchum acutum and evaluated its effect on Staphylococcus aureus*. Iraqi Journal of Biotechnology, 23(3).
- Kaur, S., Singh, H. P., Batish, D. R., & Kohli, R. K. (2012).** *Role of monoterpenes in eucalyptus communities*. Current Bioactive Compounds, 8, 101-109.
- Kettenring, K. M., & Mock, K. E. (2012).** *Genetic diversity, reproductive mode, and dispersal differ between invasive and native Phragmites australis*. Biological Invasions, 14, 2489-2504.
- Khaliq, A., Matloob, A., Farooq, M., & Mushtaq, M. N. (2011).** *Root exudates and extracts of allelopathic plants for weed management*. Allelopathy Journal, 28, 101-112.
- Khaliq, A., Matloob, A., Khan, M. B., & Tanveer, A. (2011).** *Allelopathic activity of crop residues for weed management*. Chilean Journal of Agricultural Research, 71, 418-423.
- Khamare, Y., Chen, J., & Marble, S. C. (2022).** *Allelopathy and its application as a weed management tool: A review*. Frontiers in Plant Science, 13, 1034649. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1034649>.
- Khelifi, A., et al. (2023).** *Cynanchum acutum L.: Phytochemical screening, allelopathic and cytogenotoxicity effects in the plant model Arachis hypogaea*. GSC Biological and Pharmaceutical Sciences, 23, 001-012.
- Kiviat, E. (2013).** *Ecosystem services of Phragmites in North America with emphasis on habitat functions*. AoB Plants, 5, plt008.

- Klimes, L., Klimesova, J., Hendriks, R., & van Groenendael, J. (1997).** *Clonal plant architecture: a comparative analysis*. In H. de Kroon & J. van Groenendael (Eds.), *The Ecology and Evolution of Clonal Plants*. Leiden: Backhuys.
- Klimešová, J., & Klimeš, L. (2007).** *Bud banks and their role in vegetative regeneration: a literature review and proposal for simple classification and assessment*. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 8, 115-129.
- Klimesova, J., & de Bello, F. (2009).** *CLO-PLA: the database of clonal and bud-bank traits*. *Journal of Vegetation Science*, 20, 511-516.
- Kogan, M., & Jepson, P. (2007).** *Perspectives in Ecological Theory and Integrated Pest Management*. Cambridge University Press.
- Kohli, R. K., Batish, D. R., & Singh, H. P. (1998).** *Allelopathy and its implications in agroecosystems*. *Journal of Crop Production*, 1, 169-202.
- Kohli, R. K., Batish, D. R., & Singh, H. P. (Eds.). (2006).** *Allelopathy in Agroecosystems*. Haworth Press.
- Kostina-Bednarz, M., Plonka, J., & Barchanska, H. (2023).** *Allelopathy as a source of bioherbicides: challenges and prospects for sustainable agriculture*. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 22, 471-504.
- Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952).** *Use of ranks in one-criterion variance analysis*. *Journal of the American Statistical Association*, 47, 583-621.
- Lambers, H., Chapin, F. S., & Pons, T. L. (2008).** *Plant physiological ecology (2nd ed.)*. Springer.
- Lamichhane, J. R., Devos, Y., Beckie, H. J., Owen, M. D. K., Tillie, P., Messéan, A., & Kudsk, P. (2020).** *Integrated weed management systems with herbicide-tolerant crops in the European Union: Lessons learnt from home and abroad*. *Critical Reviews in Biotechnology*, 40, 1–17.
- Larcher, W. (2003).** *Physiological Plant Ecology*. Springer.
- Le Houérou, H. N. (1995).** *Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique: diversité biologique, développement durable et désertisation*. Montpellier: CIHEAM.
- Levene, H. (1960).** *Robust tests for equality of variances*. In I. Olkin et al. (Eds.), *Contributions to Probability and Statistics*. Stanford: Stanford University Press.
- Li, Z. H., Wang, Q., Ruan, X., Pan, C. D., & Jiang, D. A. (2010).** *Phenolics and plant allelopathy*. *Molecules*, 15, 8933-8952.
- Liebman, M., Mohler, C. L., & Staver, C. P. (2001).** *Ecological Management of Agricultural Weeds*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Liu, P., et al. (2025).** *Adventitious root formation in cuttings: insights from hormones, age and molecular regulation*. *Plant developmental biology review*.

- Liu, S., et al. (2025).** *Coumarin inhibits primary root growth by modulating auxin-related processes and oxidative balance*. Plant physiology literature.
- Lopes, R. W. N., et al. (2022).** *Bioherbicidal potential of plant species with allelopathic activity*. Scientific Reports, 12, 12063.
- Macías, F. A., Galindo, J. C. G., Molinillo, J. M. G., & Cutler, H. G. (Eds.). (2004).** *Allelopathy: Chemistry and Mode of Action of Allelochemicals*. CRC Press.
- Macías, F. A., Molinillo, J. M. G., Varela, R. M., & Galindo, J. C. G. (2007).** *Allelopathy: a natural alternative for weed control*. Pest Management Science, 63, 327-348.
- Macías, F. A., Oliveros-Bastidas, A., Marín, D., Castellano, D., Simonet, A. M., & Molinillo, J. M. G. (2008).** *Degradation studies on benzoxazinoids*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 56, 6402-6413.
- Mahmoodzadeh, H., Ghasemi, M., & Zanganeh, H. (2010).** *Allelopathic plants 23. Cynodon dactylon (L.) Pers.* Allelopathy Journal, 25, 227-237.
- Mal, T. K., & Narine, L. (2004).** *The biology of Canadian weeds. 129. Phragmites australis (Cav.) Trin. ex Steud.* Canadian Journal of Plant Science, 84, 365-396.
- Marks, M., Lapin, B., & Randall, J. (1994).** *Phragmites australis: threats, management and monitoring*. Natural Areas Journal, 14, 285-294.
- Meyerson, L. A., Saltonstall, K., Windham, L., Kiviat, E., & Findlay, S. (2000).** *A comparison of Phragmites australis in freshwater and brackish marsh environments*. Wetlands Ecology and Management, 8, 89-103.
- Molisch, H. (1937).** *Der Einfluss einer Pflanze auf die andere: Allelopathie*. Gustav Fischer.
- Monaco, T. J., Weller, S. C., & Ashton, F. M. (2002).** *Weed science: Principles and practices (4th ed.)*. Wiley.
- Motmainna, M., Juraimi, A. S., Uddin, M. K., et al. (2023).** *Allelopathic potential of tropical plants: A review*. Agronomy, 13, 2063.
- Muller, C.H. (1969).** *Allelopathy as a factor in ecological process*. Vegetatio, 18, 348-357.
- Munier, P. (1973).** *Le palmier dattier*. Maisonneuve et Larose.
- Munzuroglu, O., & Geckil, H. (2002).** *Effects of metals on seed germination, root elongation and coleoptile growth in Triticum aestivum*. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 43, 203-213.
- Narwal, S. S. (1994).** *Allelopathy in Crop Production*. Scientific Publishers.
- Narwal, S. S. (Ed.). (1999).** *Allelopathy Update, Vols. 1-2*. Science Publishers.
- Narwal, S.S. (2004).** *Allelopathy in Ecological Agriculture and Forestry*. Scientific Publishers.
- Olofsdotter, M. (Ed.). (1998).** *Allelopathy in Rice*. International Rice Research Institute.
- Ozenda, P. (2004).** *Flore et végétation du Sahara*. 3e ed. Paris: CNRS Editions.

- Patil, J. R., et al. (2024).** *Flavonoids in plant-environment interactions and stress modulation*. Discover Applied Sciences / Plant Science literature.
- Pedrol, N., Reigosa, M. J., Scavo, A., & Mauromicale, G. (2024).** *Application of allelopathy in sustainable agriculture*. *Agronomy*, 14, 1362.
- Prati, D., & Bossdorf, O. (2004).** *Allelopathic inhibition of germination by Alliaria petiolata*. *Oecologia*, 141, 26-33.
- Putnam, A. R., & Duke, W. B. (1978).** *Allelopathy in agroecosystems*. *Annual Review of Phytopathology*, 16, 431-451.
- Putnam, A. R., & Tang, C. S. (Eds.). (1986).** *The Science of Allelopathy*. Wiley.
- Quézel, P., & Santa, S. (1962).** *Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales*. Paris: CNRS.
- Quinn, G. P., & Keough, M. J. (2002).** *Experimental Design and Data Analysis for Biologists*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Radosevich, S. R., Holt, J. S., & Ghera, C. M. (2007).** *Ecology of weeds and invasive plants: Relationship to agriculture and natural resource management (3rd ed.)*. Wiley.
- Ranal, M. A., & Santana, D. G. (2006).** *How and why to measure the germination process?* *Revista Brasileira de Botânica*, 29, 1-11.
- Reigosa, M. J., Sanchez-Moreiras, A., & Gonzalez, L. (1999).** *Ecophysiological approach in allelopathy*. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 18, 577-608.
- Reigosa, M. J., Pedrol, N., & González, L. (Eds.). (2006).** *Allelopathy: A Physiological Process with Ecological Implications*. Springer.
- Rice, E. L. (1984).** *Allelopathy*. 2e ed. Orlando: Academic Press.
- Rimando, A.M., Olofsdotter, M., Dayan, F.E., & Duke, S.O. (2001).** *Searching for rice allelochemicals: bioassay-guided isolation*. *Agronomy Journal*, 93, 16-20.
- Ritz, C., Baty, F., Streibig, J. C., & Gerhard, D. (2015).** *Dose-response analysis using R*. *PLOS ONE*, 10, e0146021.
- Rizvi, S. J. H., & Rizvi, V. (Eds.). (1992).** *Allelopathy: Basic and Applied Aspects*. Chapman & Hall.
- Rochecouste, E. (1962).** *Studies on the biotypes of Cynodon dactylon*. *Weed Research*, 2, 1-23.
- Rodríguez-Cerda, L., et al. (2023).** *Phenolic antioxidant protection in the initial growth of plants under allelopathic conditions*. *Plants*, 12, 3747.
- Roshchina, V. V. (2001).** *Neurotransmitters in plant life*. Science Publishers.
- Rudrappa, T., & Bais, H. P. (2008).** *Curcumin, a known phenolic from Curcuma longa, attenuates the virulence of Pseudomonas aeruginosa PAO1 in whole plant and animal pathogenicity models*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56, 1955-1962.

- Salisbury, E.J. (1961).** *Weeds and Aliens*. Collins.
- Saltonstall, K. (2002).** *Cryptic invasion by a non-native genotype of Phragmites australis*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 99, 2445-2449.
- Sampietro, D. A., Catalán, C. A. N., Vattuone, M. A., & Narwal, S. S. (Eds.). (2009).** *Isolation, Identification and Characterization of Allelochemicals/Natural Products*. Science Publishers.
- Scavo, A., & Mauromicale, G. (2021).** *Crop allelopathy for sustainable weed management in agroecosystems: knowing the present with a view to the future*. Agronomy, 11, 2104.
- Schulz, M., & Tabaglio, V. (2024).** *Allelopathy: mechanisms and applications in regenerative agriculture*. Plants, 13, 3301.
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965).** *An analysis of variance test for normality*. Biometrika, 52, 591-611.
- Singh, H. P., Batish, D. R., & Kohli, R. K. (2003).** *Allelopathic interactions and allelochemicals: new possibilities for sustainable weed management*. Critical Reviews in Plant Sciences, 22, 239-311.
- Singh, H. P., Batish, D. R., Pandher, J. K., & Kohli, R. K. (2003).** *Assessment of allelopathic properties of Parthenium hysterophorus residues*. Agriculture, Ecosystems & Environment, 95, 537-541.
- Soares, P. R., Galhano, C., & Gabriel, R. (2023).** *Alternative methods to synthetic chemical control of Cynodon dactylon (L.) Pers.: A systematic review*. Agronomy for Sustainable Development, 43, 54. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00904-w>.
- Sokal, R. R., & Rohlf, F. J. (1995).** *Biometry*. 3e ed. New York: Freeman.
- Soliman, M. I., et al. (2022).** *Antibacterial, antioxidant activities, GC-MS characterization and molecular docking analysis of Cynanchum acutum L. extracts*. Plants, 11, 3287.
- Soltys, D., Krasuska, U., Bogatek, R., & Gniazdowska, A. (2013).** *Allelochemicals as bioherbicides - present and perspectives*. Plant Physiology and Biochemistry, 62, 20-30.
- Staszek, P., Krasuska, U., Otulak-Koziel, K., et al. (2021).** *ROS metabolism perturbation as an element of mode of action of allelochemicals*. Antioxidants, 10, 1648.
- Su, J., et al. (2024).** *ROS, an important plant growth regulator in root development*. Biology, 13, 1033.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2010).** *Plant Physiology*. 5th ed. Sinauer.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015).** *Plant physiology and development (6th ed.)*. Sinauer Associates. /Oxford University Press.
- Toutain, G. (1979).** *Éléments d'agronomie saharienne: de la recherche au développement*. Paris: INRA-GRET.

- Tukey, J. W. (1949).** *Comparing individual means in the analysis of variance*. Biometrics, 5, 99-114.
- Tutin, T. G., Heywood, V. H., Burges, N. A., Moore, D. M., Valentine, D. H., Walters, S. M., & Webb, D. A. (1972).** *Flora Europaea*, Vol. 3. Cambridge: Cambridge University Press.
- Uddin, M. N., Robinson, R. W., & Caridi, D. (2014).** *Phytotoxicity induced by Phragmites australis: an assessment of allelopathic potential*. Wetlands Ecology and Management, 22, 571-583.
- Uddin, M. N., Robinson, R. W., & Asaeda, T. (2017).** *Allelopathy and the success of Phragmites australis invasion*. Biological Invasions, 19, 2017-2033.
- Underwood, A. J. (1997).** *Experiments in Ecology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Vaziritabar, Y., et al. (2014).** *Allelopathic effect of two Cynanchum acutum L. populations on emergence and shoot development of barley*. International Journal of Farming and Allied Sciences, 3, 655-660.
- Wang, S., et al. (2024).** *Allelopathy and potential allelochemicals of Ligularia virgaurea*. Plant Signaling & Behavior, 19, 2335025.
- Wang, Z. Y., et al. (2025).** *Effects of allelochemicals from plants on seed germination and early growth*. Seed Biology / Plant Science literature.
- Wathugala, D. L., et al. (2014).** *Allelopathic potential of plant residues in pot and laboratory bioassays*. Allelopathy Journal, 34, 245-256.
- Weir, T. L., Park, S. W., & Vivanco, J. M. (2004).** *Biochemical and physiological mechanisms mediated by allelochemicals*. Current Opinion in Plant Biology, 7, 472-479.
- Weston, L. A. (1996).** *Utilization of allelopathy for weed management in agroecosystems*. Agronomy Journal, 88, 860-866.
- Weston, L. A., & Duke, S. O. (2003).** *Weed and crop allelopathy*. Critical Reviews in Plant Sciences, 22(3-4), 367-389.
- Whittaker, R. H., & Feeny, P. P. (1971).** *Allelochemicals: chemical interactions between species*. Science, 171, 757-770.
- Wink, M. (2010).** *Biochemistry of Plant Secondary Metabolism*. Wiley-Blackwell.
- Wink, M. (2010).** *Functions and biotechnology of plant secondary metabolites (2nd ed.)*. Wiley-Blackwell.
- Xie, M., et al. (2024).** *Allelopathic effects of Thuidium kanedae aqueous extracts on germination and seedling growth of urban spontaneous plants*. Scientific Reports, 14, 15660.
- Xiong, Y., et al. (2024).** *Comparative transcriptomic and hormonal analyses reveal molecular mechanisms of adventitious root formation*. BMC Genomics, 25, 10989.

- Xuan, T. D., Chien, N. X., Khanh, T. D., Viet, T. D., & Minh, T. T. N. (2025).** *Advancements and challenges in allelopathy: a global perspective on agricultural practices.* Journal of Crop Health, 77, 151.
- Zaid, A., & de Wet, P. F. (2002).** *Date palm cultivation.* FAO Plant Production and Protection Paper 156.
- Zeng, R. S., Mallik, A. U., & Luo, S. M. (Eds.). (2008).** *Allelopathy in Sustainable Agriculture and Forestry.* Springer.
- Zeng, R.S., Mallik, A.U., & Luo, S.M. (2008).** *Allelopathy in sustainable agriculture and forestry: mechanisms and application.* Springer/Allelopathy literature.
- Zhang, W., et al. (2018).** *Evidence for the involvement of auxin, ethylene and ROS in root growth inhibition by an allelochemical.* Plant and Cell Physiology, 59, 1889-1904.
- Zhang, Z., Becerra-Alvarez, A., & Al-Khatib, K. (2025).** *Physiological action of bioherbicides in weed control: A systematic review.* Frontiers in Agronomy, 7, 1633565. <https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1633565>.
- Zhang, Y., et al. (2026).** *Differentiation mechanisms of rhizome clonal propagation: hormonal regulation, bud dormancy and developmental transitions.* Frontiers in Plant Science, 17, 1753652.
- Zimdahl, R.L. (2007).** *Fundamentals of weed science and allelopathic interactions.* Weed Science literature.
- Zimdahl, R. L. (2018).** *Fundamentals of Weed Science.* 5e ed. London: Academic Press.
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N., Saveliev, A. A., & Smith, G. M. (2009).** *Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R.* New York: Springer.
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., & Elphick, C. S. (2010).** *A protocol for data exploration to avoid common statistical problems.* Methods in Ecology and Evolution, 1, 3-14.

Résumé

العنوان

تقييم الإمكانات الأليوباثية لنبات *Cynanchum acutum* L. على التكاثر الخضري لكل من *Cynodon dactylon* (L.) Pers. و *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. في واحات النخيل بجنوب شرق الجزائر (ورقلة)

الملخص

تندرج هذه الدراسة في إطار البحث عن حلول بديلة ومقبولة بيئياً لتسيير النباتات العشبية المعمرة والمشكلة في النظم الزراعية الصحراوية، ولا سيما داخل واحات النخيل في الجنوب الشرقي الجزائري. وتهدف الدراسة إلى تقييم القدرة وهو نوع عفوي يتميز بقدرة عالية على التكيف، تجاه نوعين مستهدفين، *Cynanchum acutum* L. الأليوباثية لنبات وقد أنجزت الدراسة وفق *Phragmites australis* و *Cynodon dactylon* شديدي التنافس وصعبي المكافحة، وهما في *C. acutum* مقاربتين تجريبيتين متكاملتين؛ تناولت التجربة الأولى تأثير محلول مائي محضر من مسحوق أوراق، قدرة القطع الخضريه للأنواع المستهدفة على الاستئناف الحيوي وإصدار الجذور والبراعم الخضريه. أما التجربة الثانية النباتي، المطبق بجرعات مختلفة، في *C. acutum* التي أجريت في ظروف الأصص، فقد سمحت بتقييم تأثير مسحوق التكاثر الخضري والنمو الجذري والنمو الهوائي لكلا النوعين.

في التجدد *C. acutum* أظهرت النتائج المتحصل عليها وجود تأثير مثبط واضح ومعتمد على الجرعة لنبات الخضري للأنواع المدروسة. فقد أدت المعاملات الأكثر تركيزاً إلى خفض شديد، بل وإلى إيقاف شبه كامل في بعض الحالات، لإصدار الجذور والبراعم الخضريه، مما يعكس اضطراباً مهماً في عمليات استئناف النمو واستقرار الوحدات التكاثرية الخضريه. كما بينت التحاليل الإحصائية وجود فروق عالية المعنوية بين المعاملات، مع انخفاض تدريجي في *C. dactylon* و *P. australis* مؤشرات النمو كلما ارتفعت الجرعة المطبقة. وقد لوحظت هذه الاستجابة لدى كل من مع اختلاف شدة التثبيط تبعاً للنوع النباتي، وطبيعة المادة النباتية المستعملة، والمتغير المقاس. كما أكدت المؤشرات، المصححة والمنسوبة إلى عدد العقد الابتدائية أن التأثير الملاحظ لا يرتبط فقط بالتباين المورفولوجي الأولي للقطع النباتية *C. acutum*. بل يعبر عن فعل بيولوجي حقيقي للمركبات الصادرة عن

يمتلك قدرة أليوباثية واعدة يمكن تثمينها ضمن منظور *C. acutum* وعليه، تشير مجمل النتائج إلى أن البيوتكنولوجيا النباتية المطبقة في التسيير الزراعي البيئي للأعشاب المعمرة. ويمكن أن تشكل هذه المقاربة أساساً لتطوير مبيدات حيوية عشبية ذات أصل نباتي أو استراتيجيات متكاملة لمكافحة الأعشاب الضارة في نظم زراعة النخيل الصحراوية. غير أن ذلك يتطلب مزيداً من التحقق العلمي، خاصة من خلال تحديد المركبات النشطة بيولوجياً المسؤولة عن التأثير، وتقييم ثباتها، ودراسة انتقائيتها تجاه المحاصيل ذات الأهمية الزراعية، وتأكيد فعاليتها في الظروف الطبيعية للواحات.

الكلمات المفتاحية: الأليوباثية؛ التكاثر الخضري؛ مبيد حيوي عشبي

Title: Assessment of the allelopathic potential of *Cynanchum acutum* L. on the vegetative propagation of *Cynodon dactylon* (L.) Pers. and *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. in the palm groves of south-eastern Algeria (Ouargla)

Abstract

This study falls within the search for ecologically acceptable alternative solutions for the management of problematic perennial weeds in Saharan agrosystems, particularly in the palm groves of southeastern Algeria. It evaluates the allelopathic potential of *Cynanchum acutum* L., a spontaneous species with a high adaptive capacity, against two highly competitive and difficult-to-control target species: *Cynodon dactylon* and *Phragmites australis*. The study was conducted through two complementary experimental approaches. The first trial investigated the effect of an aqueous solution prepared from *C. acutum* leaf powder on the regeneration capacity, root emission, and vegetative shoot emission of vegetative fragments of the target species. The second trial, carried out under pot conditions, assessed the effect of *C. acutum* plant powder, applied at different doses, on vegetative multiplication, root growth, and aerial growth of the two species.

The results revealed a clear and dose-dependent inhibitory effect of *C. acutum* on the vegetative regeneration of the studied species. The most concentrated treatments strongly reduced, or even completely suppressed, root and vegetative emissions, indicating a marked disturbance of the processes involved in propagule recovery and establishment. Statistical analyses showed highly significant differences among treatments, with a progressive decrease in growth parameters as the applied dose increased. This response was observed in both *C. dactylon* and *P. australis*, although the intensity of inhibition varied according to the species, the type of plant material used, and the measured variable. The corrected parameters expressed relative to the initial number of nodes confirmed that the observed effect was not merely related to the initial morphological variability of the fragments, but reflected a genuine biological action of compounds derived from *C. acutum*.

Overall, the findings suggest that *C. acutum* has a relevant allelopathic potential that could be valorized within a plant biotechnology perspective applied to the agroecological management of perennial weeds. This approach may provide a basis for the development of plant-derived bioherbicides or integrated weed management strategies in Saharan date palm-based systems. However, further validation remains necessary, particularly through the identification of the involved bioactive compounds, the assessment of their stability, the evaluation of their selectivity toward crops of interest, and the confirmation of their effectiveness under natural palm grove conditions.

Keywords: *Cynanchum acutum*; allelopathy; vegetative multiplication; bioherbicide.

Résumé

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la recherche de solutions alternatives, écologiquement acceptables, pour la gestion des plantes adventices vivaces problématiques des agrosystèmes sahariens, en particulier dans les palmeraies du Sud-Est algérien. Elle porte sur l'évaluation du potentiel allélopathique de *Cynanchum acutum* L., espèce spontanée à forte capacité d'adaptation, vis-à-vis de deux espèces cibles fortement compétitives et difficiles à maîtriser : *Cynodon dactylon* et *Phragmites australis*. L'étude a été conduite à travers deux approches expérimentales complémentaires. Le premier essai a concerné l'effet d'une solution aqueuse préparée à partir de poudre foliaire de *C. acutum* sur les capacités de reprise, d'émission racinaire et d'émission végétative des fragments végétatifs des espèces cibles. Le second essai, réalisé en conditions de pots, a permis d'évaluer l'effet de la poudre végétale de *C. acutum*, appliquée sous différentes doses, sur la multiplication végétative, la croissance racinaire et la croissance aérienne des deux espèces.

Les résultats obtenus mettent en évidence un effet inhibiteur net et dose-dépendant de *C. acutum* sur la régénération végétative des espèces étudiées. Les traitements les plus concentrés ont fortement réduit, voire supprimé, les émissions racinaires et végétatives, traduisant une perturbation importante des processus de reprise et d'installation des propagules. Les analyses statistiques ont montré des différences hautement significatives entre les traitements, avec une diminution progressive des paramètres de croissance lorsque la dose appliquée augmente. Cette réponse a été observée aussi bien chez *C. dactylon* que chez *P. australis*, bien que l'intensité de l'inhibition varie selon l'espèce, le type de matériel végétal utilisé et la variable mesurée. Les paramètres corrigés et rapportés au nombre de nœuds initiaux ont permis de confirmer que l'effet observé n'est pas uniquement lié à la variabilité morphologique initiale des fragments, mais traduit bien une action biologique des composés issus de *C. acutum*.

L'ensemble des résultats suggère que *C. acutum* possède un potentiel allélopathique intéressant, susceptible d'être valorisé dans une perspective de biotechnologie végétale appliquée à la gestion agroécologique des adventices vivaces. Cette approche pourrait constituer une base pour le développement de bioherbicides d'origine végétale ou de stratégies intégrées de gestion des mauvaises herbes dans les systèmes phoenicicoles sahariens. Toutefois, une validation complémentaire reste nécessaire, notamment par l'identification des composés bioactifs impliqués, l'évaluation de leur stabilité, l'étude de leur sélectivité vis-à-vis des cultures d'intérêt et la confirmation de leur efficacité en conditions naturelles de palmeraie.

Mots clés

Cynanchum acutum ; allélopathie ; multiplication végétative ; bioherbicide.