



BIBLIOTHÈQUE

CÉGEP DE L'ABITIBI-TÉMISCAMINGUE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans [Depositum](#), site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous. L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) obtained the permission of the author to use a copy of this document for nonprofit purposes in order to put it in the open archives [Depositum](#), which is free and accessible to all. The author retains ownership of the copyright on this document.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

CAPACITÉ DU POURGHÈRE (*JATROPHA CURCAS* L.) À CROÎTRE SUR UN
SOL DÉGRADÉ ET À RESTAURER CERTAINES DE SES
CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES

THÈSE

PRÉSENTÉE

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DU DOCTORAT EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR

RENAUD MASSOUKOU PAMBA

AVRIL 2024

REMERCIEMENTS

Une thèse de doctorat est le fruit d'un important travail de longue haleine qui a nécessité beaucoup de sacrifices. Cependant, il n'aurait jamais été effectif sans le concours direct et indirect d'un bon nombre de personnes à qui je voudrais témoigner ma profonde reconnaissance.

Mes premiers remerciements vont à l'endroit du Programme Canadien des Bourses de la Francophonie (PCBF) dont la lettre figure à l'ANNEXE B et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue dont la lettre d'acceptation figure à l'ANNEXE C. Le PCBF est l'organisme qui a rendu cette thèse possible en m'octroyant une bourse qui a permis de financer mes études jusqu'à l'aboutissement de ce travail, je vous en suis très reconnaissant. À l'UQAT, j'exprime ma gratitude car vous avez accepté que cette thèse se déroule au sein de votre institution dont le cadre et le suivi de l'ensemble des intervenants me satisfait grandement.

Mes remerciements s'adressent ensuite, et avec beaucoup de satisfaction, à mon Directeur de thèse, le Professeur Vincent POIRIER pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de diriger ma thèse et de m'avoir accueilli dans son équipe de travail. Vincent s'est toujours montré très disponible et à mon écoute tout au long de la rédaction de cette thèse à travers des conseils précieux et avisés à la hauteur de ses compétences et de ses réelles qualités humaines. Son aide a été inestimable car sa rigueur scientifique m'a profondément et agréablement touché. En partageant avec moi sa grande expérience en recherche, sa vision dans les domaines de la séquestration de carbone et de la restauration des sols dégradés, Vincent a contribué significativement à faire évoluer mes réflexions et mes connaissances au cours de ces quatre dernières années. Puisses-tu trouver en ces quelques lignes l'expression de ma profonde

reconnaissance et s'il faut travailler avec toi pour des éventuelles réalisations scientifiques futures, je n'hésiterai pas un instant.

Mes remerciements vont également à l'endroit de mon codirecteur de thèse le Professeur Pamphile NGUEMA NDOUTOUMOU pour sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce travail. Je tiens à te remercier d'abord pour avoir accepté de codiriger cette thèse, mais aussi pour avoir mis à ma disposition gratuitement le site expérimental qui a permis de réaliser mes travaux. J'adresse mes chaleureux remerciements à Pamphile, pour ton attention de tout instant sur mes travaux, pour ses conseils avisés et ton écoute qui ont été prépondérants pour la bonne réussite de cette thèse. Son énergie et sa confiance ont été des éléments moteurs pour moi. J'ai pris un grand plaisir à travailler avec toi.

Je voudrais remercier mon épouse Madame Valérie SAMA EPSE MASSOUKOU PAMBA qui a toujours su m'encourager à poursuivre mes études. Il y a 10 ans, j'ai dû me séparer de toi et des enfants pendant deux ans lors de mon Diplôme d'Études Approfondies (DEA) effectué à Lomé, au Togo et maintenant pendant près de cinq ans pour ma thèse de Doctorat à Rouyn-Noranda, au Canada. Tu as toujours su me comprendre et partager avec moi pendant ces temps distants, les moments de joies et de souffrances. Que la présente thèse nous comble de joie et nous conduise vers des meilleures opportunités de réussite sociale.

Mes remerciements vont également à l'endroit de Monsieur Hervé Patrick OPIANGHA, Ministre des Mines du Gabon pour son énorme soutien financier qui est arrivé à point nommé. Monsieur le Ministre, trouvez en ces quelques lignes l'expression de ma profonde gratitude et merci de contribuer au développement intellectuel des cadres de Mounana.

Je tiens à remercier Monsieur Moussa pour sa forte contribution technique sur le site expérimental. Ton aide dans les travaux de suivi de plantation tels que de débroussaillage, nettoyage, désherbage et même pendant les phases de collecte des données m'ont été très utiles.

Mes remerciements vont également à l'endroit de plusieurs autres personnes qui m'ont apporté leur soutien lors de la réalisation de cette thèse. Il s'agit de Sedjro Antoine T. AFFOSSOGBE et Judi Armel BOUROBOU BOUROBOU pour les orientations lors des analyses statistiques, Aimé Alyas LYBESHI MOUDENDA et Raymond PENDI, pour m'avoir accueilli au Canada puis leur soutien matériel à chaque déplacement sur le terrain, Donatien MOUNGALA, Directeur Provincial des Eaux et Forêts du Woleu-Ntem, au Gabon pour ses grands appuis logistiques.

À mes grands frères Richard PAMBA et Alix PAMBA qui malgré toutes leurs responsabilités au sein de la famille, n'ont jamais cessé de m'encourager à poursuivre mes études et de mettre à ma disposition les moyens nécessaires, je vous en suis reconnaissant.

À mes sœurs : Virginie PAMBA MOUBOLO, Rosalie PAMBA MATSEMBA, Edwige PAMBA, Flore PAMBA, Julie BIKANGHA et Prisca PAMBA MATSOONI, je tiens à vous exprimer ma reconnaissance pour tous les sacrifices consentis à mon égard.

À mes filles Rézie Anaïs BAILI PAMBA, Sarra Kerri PAMBA MASSOUKOU et Brenna Clémentine BANGOUSSOU PAMBA, j'exprime tout mon amour et ma profonde gratitude pour tout le temps où je n'ai pas pu être à vos côtés et assurer mes responsabilités de père.

Je remercie Mesdames Danièle LAPORTE et Mélissa TOBLER pour leur incroyable disponibilité. Il faut reconnaître que ces personnes, par leur efficacité incommensurable en ce qui a trait aux démarches administratives et logistiques, ont participé significativement à faciliter mon cheminement dans les méandres du doctorat.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit du programme de soutien à la réalisation des projets courts FIRC/FUQAT (2021-2022), répertorié à l'ANNEXE D et le programme de bourse de dépôt de thèse de la Fondation J.A DeSève (ANNEXE E) à travers lequel j'ai pu bénéficier des bourses. En effet, ces subventions sont arrivées chacune à point nommé dans mon parcours universitaire.

Je tiens également à remercier Mesdames Bibiane MAKOUBI BOKOKO et Mouna MAMBENDA BOKOKO pour leur énorme soutien financier pendant la réalisation de ces travaux.

À tout le reste de ma famille, je vous remercie pour le soutien que vous m'avez toujours apporté.

À mes collègues de promotion, Jules Hade Wenkouni DARANKOUM, son épouse Yasmine, son fils Yanis, Apolline MEDZEY ME SIMA et Marthe OUÉDRAOGO j'exprime ma satisfaction et ma sympathie pour l'harmonie qui a régné entre nous.

DÉDICACE

À la mémoire de ma mère, feu Clémentine BANGOUSSOU épouse PAMBA, disparue le 3 janvier 2020. Pour ses sacrifices inestimables pour la réussite de ses enfants, moi particulièrement, et à mon père Georges PAMBA pour les encouragements et le financement de mes études. Chers parents vous qui n'avez jamais cessé votre devoir de père et de mère, trouvez en cette Thèse de Doctorat en Sciences de l'Environnement le fruit de la graine que vous avez semée et arrosée pendant tout ce temps :

Pour m'avoir toujours soutenu dans les moments les plus sombres de ma vie,

Pour m'avoir toujours aimé malgré mes erreurs,

Pour m'avoir toujours orienté dans mes décisions, et

Pour m'avoir toujours encouragé et soutenu dans mes études.

AVANT-PROPOS

Le présent document constitue un essai de thèse produit comme exigence partielle du doctorat en sciences de l'environnement qui est offert en association dans le réseau des universités du Québec. Le doctorat en sciences de l'environnement a pour objectif de former des scientifiques capables d'établir des ponts avec d'autres disciplines des sciences de l'environnement et conscients des interdépendances dynamiques en environnement. Les jeunes chercheurs doivent être capables de dépasser les barrières disciplinaires afin de faire face à des problèmes complexes et contribuer de manière éclairée à la résolution de problèmes environnementaux. Les étudiants doctorants en sciences de l'environnement évoluent dans un environnement de recherche multidisciplinaire et dynamique au sein d'une équipe de professeurs de calibre international. Cette thèse de doctorat est rédigée sous forme d'articles scientifiques afin de se conformer à l'approbation du Sous-comité d'admission et d'évaluation de l'Université du Québec à Montréal. Elle est composée d'une introduction générale, de trois chapitres qui sont des articles scientifiques et une conclusion générale. Le chapitre II, intitulé : « Le semis en pots permet de mieux implanter le *Jatropha curcas* L. en milieu tropical humide » a été soumis dans la revue *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* (BASE), le 08 septembre 2023. Cette revue est indexée et a un facteur d'impact de 1.235 en 2022. La rédaction principale a été assurée par Renaud Massoukou Pamba, Vincent Poirier, Pamphile Nguema Ndoutoumou et Terence Epule Epule qui s'est ajouté lors de la révision de cet article. L'expérimentation a été assurée par Renaud Massoukou Pamba. Le chapitre III est intitulé : « L'écartement de plantation affecte différemment la croissance végétative du *Jatropha curcas* L. en culture sur un sol surexploité au nord du Gabon ».

International Journal of Biological and Chemical Sciences, **16**(1), 158-172. La rédaction principale a été assurée par Renaud Massoukou Pamba, Vincent Poirier et Pamphile Nguema Ndoutoumou, l'expérimentation a été assurée par Renaud Massoukou Pamba. Le chapitre IV correspond au troisième article de cette thèse et il est intitulé : « Growing *Jatropha curcas* L. improves the chemical characteristics of degraded tropical soils: the case of carbon, nitrogen and pH ». Cet article a été soumis en février dans la revue *Tropical Ecology*, qui a un facteur d'impact de 1.37 en 2022. La rédaction principale a été assurée par Renaud Massoukou Pamba, Pamphile Nguema Ndoutoumou, Terence Epule Epule et Vincent Poirier. L'expérimentation a été assurée par Renaud Massoukou Pamba. A l'annexe A, nous avons une synthèse scientifique soumise le 11 octobre 2023, accepté le 25 octobre et publié le 9 décembre 2023 par la revue *Land* détenant un facteur d'impact de 3.9 en 2022. « Massoukou Pamba, R., Poirier, V., Nguema Ndoutoumou, P., & Epule, T. E. (2023). How Can Plants Help Restore Degraded Tropical Soils? *Land*, 12(12), 2147. DOI: <https://doi.org/10.3390/land12122147> » Cette synthèse a été produite pendant le cours de Synthèse environnementale (ENV9403), puis elle a été considérablement améliorée pour répondre aux exigences d'une synthèse scientifique pouvant être soumise pour publication dans une revue.

Pour la réalisation de cette thèse, les travaux de terrain (annexe F) et de laboratoire (annexe G), la collecte des données, les analyses statistiques et bio-informatiques, les interprétations des résultats et l'écriture des manuscrits ont été réalisées par Renaud Massoukou Pamba (RMP) pour les trois chapitres de la thèse ainsi que pour la synthèse qui a été annexée. Le directeur de thèse Vincent Poirier (VP), le codirecteur de thèse Pamphile Nguema Ndoutoumou (PNN) ont contribué tout au long de cette procédure dans leurs champs d'expertises et de compétences respectifs. Terence Epule Epule (TEE) s'est ajouté et a contribué à la révision du deuxième et du quatrième chapitre ainsi que la synthèse. L'apparition de leur nom dans la liste des auteurs de chacun des

manuscripts est fonction de leur implication respective dans la réalisation de chacun des chapitres. Il faut souligner que nous avons eu le soutien de Sedjro Antoine T. Affossogbe (SATA) pour les analyses statistiques et biostatistiques ainsi que pour l'interprétation des résultats. Tous les co-auteurs ont participé à la révision des versions finales de chaque article et ont donné leur approbation pour les publier.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	xv
LISTE DES TABLEAUX.....	xviii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xix
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS.....	xx
RÉSUMÉ.....	xxii
ABSTRACT.....	xxiv
CHAPITRE 1 INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Problématique	2
1.3 Synthèse des connaissances	4
1.3.1 Indicateurs de dégradation des sols.....	4
1.3.2 Technique de restauration des sols.....	5
1.3.3 Éléments de bibliographie sur <i>Jatropha curcas</i>	5
1.3.4 Multiplication, développement et croissance du pourghère.....	16
1.4 Objectifs et hypothèses.....	20
1.4.1 Objectif général.....	20
1.4.2 Objectifs spécifiques	20
1.5 Hypothèses de recherche.....	21
CHAPITRE 2 LE SEMIS EN POTS PERMET DE MIEUX IMPLANTER LE <i>JATROPHAS CURCAS</i> L. EN MILIEU TROPICAL HUMIDE.....	22
2.1 Résumé.....	23
2.2 Introduction	26
2.3 Matériel et méthodes	28
2.3.1 Localisation du site de l'étude	28
2.3.2 Dispositifs expérimentaux	30
2.4 Mesure des paramètres de germination et de croissance juvénile.....	33
2.5 Analyse statistique	35
2.6 Résultats	36
2.6.1 Germination du <i>Jatropha curcas</i>	36
2.6.2 Croissance du <i>Jatropha curcas</i>	37
2.7 Discussion	42
2.7.1 Germination	42
2.7.2 Croissance	45

2.8 Conclusion	46
2.9 Conflit d'intérêts	47
2.10 Contributions des auteurs	47
CHAPITRE 3 L'ECARTEMENT DE PLANTATION AFFECTE	
DIFFÉREMENT LA CROISSANCE VÉGÉTATIVE DU <i>JATROPHA CURCAS</i>	
L. EN CULTURE SUR UN SOL SUREXPLOITÉ AU NORD DU GABON.....	
3.1 Résumé	49
3.2 Introduction	50
3.3 Matériel et méthodes	53
3.3.1 Localisation du site	53
3.3.2 Caractéristiques des sols	54
3.3.3 Matériel végétal et transplantation	56
3.3.4 Dispositif expérimental	57
3.3.5 Mesure des paramètres morphométriques.....	58
3.4 Analyse statistique	59
3.5 Résultats	60
3.5.1 Propriétés physico-chimiques du sol.....	60
3.5.2 Croissance en hauteur et diamètre au collet des plants.....	61
3.5.3 Évolution du nombre de feuilles	64
3.7 Discussion	66
3.8 Conclusion	69
3.9 Conflit d'intérêts	70
3.10 Contributions des auteurs	70
CHAPITRE 4 GROWING <i>JATROPHA CURCAS</i> L. IMPROVES	
THE CHEMICAL CHARACTERISTICS OF DEGRADED TROPICAL	
SOILS: THE CASE OF CARBON, NITROGEN AND Ph.....	
4.1 Abstract	72
4.2 Introduction	75
4.3 Material and method	77
4.3.1 Description of the study site and experimental set-up	77
4.3.2 Soil sampling and analysis.....	79
4.3 Statistical analysis	80
4.4 Results	81
4.5 Discussion	87
4.5.1 Soil organic carbon concentration.....	87
4.5.2 Total soil nitrogen concentration	89
4.5.3 Soil acidity	91
4.6 Conclusion	92
4.7 Conflict of interest.....	93
4.8 Authors' contributions	93

CHAPITRE 5 CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	94
5.1 Bilan du travail.....	94
5.2 Perspectives.....	97
5.2.1 Amélioration de certaines caractéristiques physiques des sols.....	97
5.2.2 Amélioration de certaines caractéristiques biologiques des sols	99
ANNEXE A HOW CAN PLANTS HELP RETORE DEGRADED TROPICAL SOILS?.....	100
A.1. Abstract	100
A.2. Introduction	103
A.3. Methodology	105
A.4. Results and Discussion.....	109
A.4.1 Tropical soil degradation and importance of their restoration	109
A.4.2 Involving plants in the restoration of degraded tropical soils.....	110
A.4.3 Nitrogen fixation to restore degraded tropical soils.....	114
A.4.4 Carbon sequestration to restore degraded tropical soils.....	116
A.4.4.1 Carbon sequestration mechanisms	116
A.4.4.2 Examples of plant species to sequester C and restore degraded tropical soils	117
A.4.5 Organic matter addition to restore the fertility of degraded tropical soils	119
A.4.5.1 Soil fertility and organic matter addition mechanisms	119
A.4.5.2 Examples of species that provide organic matter to restore tropical soils' fertility.....	120
A.4.6 Structure stabilization to restore degraded tropical soils	121
A.4.7 Controlling water and wind erosion to restore degraded tropical soils.....	124
A.4.7.1 Mechanisms to control water and wind erosion	124
A.4.7.2 Examples of plant species to control erosion and restore degraded tropical soils.....	124
A.4.8 Limitations to the use of plants to help restore degraded tropical soils .	126
A.5 Conclusion.....	127
A.6 Funding:	129
A.7 Data Availability Statement:	129
A.8 Conflicts of Interest:.....	129
A.9 References	129
ANNEXE B LETTRE DE BOURSE DU PROGRAMME CANADIEN BOURSES DE LA FRANCOPHONE (PCBF).....	151
ANNEXE C LETTRE D'ADMISSION DE L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TEMISCAMINGUE.....	152
ANNEXE D LETTRE DES SUBVENTIONS DE RECHERCHE A LA CRÉATION (FIRC/FUQAT).....	153
ANNEXE E LETTRE DE LA FONDATION JA DESÈVE	154

ANNEXE F PHOTOS DES TRAVAUX DE TERRAIN.....	155
ANNEXE G PHOTOS DES ACTIVITES AU LABORATOIRE.....	157
BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE.....	159

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
2.1 Localisation du village Akam Effak où est situé le site de l'étude.	30
2.2 Croissance des plantules de <i>J. curcas</i> en Hauteur, Diamètre et Nombre de feuilles issus de semis en pot des graines et des boutures. La zone ombragée représente l'intervalle de confiance à 95%. À la figure 2.3a, l'intervalle de confiance est masqué par les courbes.	39
2.3 Croissance des plantules de <i>J. curcas</i> dans le temps en plein champs. La zone ombragée représente l'intervalle de confiance à 95%. À la figure 2.3a, l'intervalle de confiance est masqué par les courbes.	41
3.1 Localisation du village Akam Effack dans le département du Ntem, province du Woleu-Ntem au Gabon.	54
3.2 Prise des mesures.	59
3.3 Croissance en hauteur du <i>J. curcas</i> en fonction du type de matériel végétal et de l'écartement de semis après un an. La 1 ^{ère} lettre (majuscule) : comparaison entre les écartements pour un même type de matériel végétal, la 2 ^{ème} lettre (minuscule) : comparaison entre les plantes issues des graines et des boutures dans un même écartement.....	62
3.4 Evolution de la hauteur des plants dans le temps. PSP = petite saison des pluies ; GSP = grande saison des pluies ; GSS = grande saison sèche ; PSS = petite saison des pluies.....	63
3.5 Évolution du diamètre au collet suivant les écartements de semis et le temps. PSP = petite saison des pluies ; GSP = grande saison des pluies ; GSS = grande saison sèche ; PSS = petite saison des pluies.	64

3.6 Évolution du nombre de feuilles de <i>Jatropha curcas</i> , selon le type de matériel végétal et la densité de plantation.	65
4.1 Location of Akam Effak village (a) within the province of Woleu-Ntem (b) in Northern Gabon, West Africa (c).....	78
4.2 Comparison of soil organic carbon concentrations between October 2019 and November 2022 after 40 months of growth of <i>J. curcas</i> at 0-10 cm (a) and 10-20 cm (b) depths on a tropical soil that has been previously cultivated intensively during 43 years for rubber and cacao production. Means associated with different letter differ significantly from each other at $P < 0.10$. Vertical bars represent mean standard error. The horizontal red line presents the values of undisturbed natural forest soil used as a reference.	83
4.3 Comparison of total soil nitrogen concentrations between October 2019 and November 2022 after 40 months of growth of <i>J. curcas</i> at 0-10 cm on a tropical soil that has been previously cultivated intensively during 43 years for rubber and cacao production. Means associated with different letter differ significantly from each other at $P < 0.10$. Vertical bars represent mean standard error. The horizontal red line presents the value of undisturbed natural forest soil used as a reference.	84
4.4 Comparison of soil pH between October 2019 and November 2022 after 40 months of growth of <i>J. curcas</i> at 0-10 cm (a) and 10-20 cm (b) depths on a tropical soil that has been previously cultivated intensively during 43 years for rubber and cacao production. Means associated with different letter differ significantly from each other at $P < 0.10$. Vertical bars represent mean standard error. The horizontal red line presents the values of undisturbed natural forest soil used as a reference.	85

4.5 Comparison of soil pH at 10-20 cm depth between the two types of propagation material used to grow <i>J. curcas</i> on a tropical soil that has been previously cultivated intensively during 43 years for rubber and cacao production. Means associated with different letter differ significantly from each other at $P < 0.10$. Vertical bars represent mean standard error. The horizontal red line presents the values of undisturbed natural forest soil used as a reference.....	86
--	----

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
2.1 Germination des graines et des boutures de <i>J. curcas</i> semées en pot.....	36
2.2 Germination des boutures et des graines de <i>J. curcas</i> semées en plein champ	37
2.3 Effet du type de matériel végétal et du temps sur la croissance du <i>J. curcas</i> en pot.....	38
2.4 Effet du temps sur la croissance du <i>J. curcas</i> en en plein champ.	40
3.1 Paramètres physico-chimiques du site expérimental	55
3.2 Croissance du <i>Jatropha curcas</i> en hauteur, diamètre au collet et nombre de feuilles.....	61
4.1 Effects of different sources of variation on soil organic carbon (C) and total soil nitrogen (N) concentrations and soil pH at 0-10 cm and 10-20 cm depth.	82

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

ANOVA	Analyse de la variance
COS	Carbone organique du sol
FUQAT	Fondation de l'université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
GSP	Grande saison des pluies
GSS	Grande saison sèche
MEPNRT	Ministère de l'Environnement, de la Protection de la Nature, de la Recherche et de la Technologie
MOS	Matière organique du sol
PANLCDT	Programme d'Action National de Lutte Contre la Dégradation des Terres
PCBF	Programme canadien des bourses de la francophonie
PIB	Produit Intérieur Brut
PSP	Petite saison des pluies
PSS	Petite saison sèche.

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS

@	Original
%	Pourcentage
°C	Degré Celsius
°N	Degré de latitude Nord
°W	Degré de longitude Ouest
µm	Micrometre
Al	Aluminium
Ca	Calcium
CaCl ₂	Chlorure de calcium
Cu	Cuivre
cm	Centimètre
cm ²	Centimètre carré
Fe	Fer
g	Gramme
g C kg ⁻¹	Gramme de carbone par kilogramme de sol
g kg ⁻¹	Gramme par kilogramme
h	Heure

ha	Hectare
K	Potassium
kg	Kilogramme
m	Mètre
m ²	Mètre carrée
mg	Milligramme
Mg	Magnésium
mg C kg ⁻¹	Milligramme de carbone par kilogramme de sol
mg N kg ⁻¹	Milligramme d'Azote par kilogramme de sol
mm	Millimètre
Mn	Manganèse
N	Azote
Na	Sodium
P	Phosphore
pH	Potentiel hydrogène
yr	Année
Zn	Zinc

RÉSUMÉ

La superficie des sols dégradés ne cesse de croître dans le monde. Au Gabon, cette dégradation des sols à grande échelle est majoritairement liée à l'action anthropique. Il est donc judicieux d'explorer des pistes de restauration des sols appauvris afin de pouvoir les utiliser en agriculture. Nous avons expérimenté pendant quatre ans l'une des méthodes modernes de restauration des sols, qui consiste à utiliser des plantes dites améliorantes tel que le pourghère (*Jatropha curcas* L.) qui a des effets positifs sur certaines propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols et qui présente plusieurs vertus. Le pourghère présente l'avantage de reconstituer la matière organique du sol par la chute importante de ses feuilles et améliore ainsi les propriétés agronomiques des sols dégradés. Il possède des capacités pour la stabilisation physique des sols et peut régénérer leur fertilité en y fixant de l'azote atmosphérique dans la rhizosphère. C'est une plante résistante à la sécheresse, peu exigeante en eau et qui peut pousser presque partout, même sur les sols marginaux les plus pauvres. Toutes ces raisons justifient le choix du pourghère pour la restauration des sols dégradés.

L'objectif général de cette thèse est d'abord de démontrer que le pourghère peut se multiplier sur un sol pauvre en éléments nutritifs, puis d'y suivre sa croissance, et de montrer qu'il est capable d'améliorer certaines caractéristiques chimiques de ce sol. Premièrement, il a été question de déterminer le meilleur mode de multiplication entre les graines et les boutures en déterminant les taux de germination et de survie, les temps de latence et la croissance juvénile des plantules. Ensuite, nous avons déterminé la capacité du pourghère à croître sur un sol dégradé, et enfin nous avons évalué le potentiel du pourghère à améliorer certaines caractéristiques chimiques des sols tropicaux dégradés.

Les résultats de notre étude montrent que le taux de germination est de 97% pour les graines et 94% pour les boutures en semis en pot, contre respectivement 5% et 1,4% en semis direct. La hauteur et le diamètre au collet des plantules varient suivant l'effet combiné du temps et du type de matériel végétal et la production foliaire des plantules du *J. curcas* L, varie suivant le temps et suivant le type de matériel végétal. Après la transplantation, les résultats révèlent que la croissance en hauteur des plantes de *J. curcas* est influencée de manière très significative par l'interaction du type de matériel végétal et de l'écartement de semis et que le diamètre au collet s'accroît avec le temps. L'émission des feuilles est active de novembre à décembre et est suivi d'une perte

considérable et continue des feuilles le reste du temps d'observation. Les résultats d'analyse des sols montrent que le *J. curcas* améliore les concentrations en carbone et en azote du sol et qu'il régule le pH. La concentration en carbone (C) sur les deux profondeurs et en azote (N) à la surface, ainsi que le pH du sol sur les deux profondeurs sont influencés de manière significative suivant l'âge de la plantation. Les plantes issues des boutures ont une meilleure amélioration du pH que celles issues des graines.

Les résultats de cette étude mettent en exergue les questions de restauration des sols tropicaux dégradés en utilisant les plantes améliorantes. Nos résultats montrent que le *J. curcas* améliore les propriétés chimiques des sols tropicaux dégradés par la surexploitation intensive et successive de cacaoyers et d'hévéas. Cependant, des recherches futures permettront de vérifier si les propriétés biologiques et physiques des sols sont également concernées par cette amélioration.

Mots clés : *Jatropha curcas* L., sols dégradés, restauration des sols, sols tropicaux, graines, boutures, durée de reprise, concentration en carbone et en azote du sol, pH du sol

ABSTRACT

The surface area of degraded soils continues to grow worldwide. In Gabon, this large-scale soil degradation is the result of human activities. It therefore makes sense to explore ways of restoring impoverished soils for use in agriculture. For a period of four years, we experimented one of the modern methods of soil restoration, which involves the use of so-called "soil improvers" such as *Jatropha curcas* L., which has positive effects on some physical, chemical, and biological properties of soils, and has a number of virtues. The *J. curcas* has the advantage of reconstituting humus through the heavy fall of its leaves, thus improving the agronomic properties of degraded soils. It has the ability to physically stabilize soils and can regenerate their fertility by fixing atmospheric nitrogen in the rhizosphere. It is a drought-resistant plant that requires little water. All these reasons justify the choice of *Jatropha* for the restoration of degraded soils.

The general aim of this thesis is first to demonstrate that *J. curcas* can multiply on a nutrient-poor soil, then to monitor its growth, and to show that it can improve certain chemical characteristics of this soil. Firstly, we determined the best propagation method between seeds and cuttings by determining germination and survival rates, lag times and juvenile growth of seedlings. Next, we also determined *Jatropha*'s ability to grow on degraded soil, and finally we assessed *Jatropha*'s potential to improve certain chemical characteristics of degraded tropical soils.

The results of our study show that the germination rate is 97% for seeds and 94% for cuttings in pot sowing, compared with 5% and 1.4% respectively in direct sowing. Seedling height and collar diameter varied according to the combined effect of time and type of planting material, and leaf production of *J. curcas* seedlings varied according to time and type of planting material. After transplanting, results showed that height growth of *J. curcas* plants was significantly influenced by the interaction of planting material type and planting spacing, and that crown diameter growth increased with time throughout the year. Leaf emission had a growth phase, followed by a continuous decrease over the rest of the observation period. Soil analysis results show that *J. curcas* improves soil carbon and nitrogen concentrations and regulates pH. Carbon (C) concentration at both depths and nitrogen (N) concentration at the surface, as well as soil pH at both depths, are significantly influenced by planting age. Plants grown from cuttings show a better improvement in pH than those grown from seed.

The results of this thesis highlight the issues involved in restoring degraded tropical soils using soil improvers. Overall, this restoration must bring about improvements in the physical, chemical and biological properties of soils. Our results show that *Jatropha curcas* improves the chemical properties of tropical soils degraded by successive intensive overexploitation of cocoa and rubber. However, further research is needed to verify whether the biological and physical properties of soils are also affected by this improvement.

Keywords: *Jatropha curcas* L., soil degradation, restoration of degraded soils, tropical soils, seeds, cuttings, recovery time, soil carbon and nitrogen concentration, soil pH

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Mise en contexte

Le sol est une entité naturelle, c'est-à-dire dont l'existence initiale ne dépend pas de l'homme (Hubert, 2008). Le sol assure plusieurs fonctions écologiques et on y retrouve des éléments nécessaires à la vie (eau, matières organiques, nutriments), (Arrouays et al., 2003). Il y a la fonction biologique qui se caractérise par l'hébergement d'une large part de la biodiversité terrestre (Chaussod et al., 1996; Calvet, 2003; Cluzeau et al., 2009). Le sol remplit aussi de nombreuses fonctions, telle que la fonction alimentaire (Boukharaeva et Marloie, 2011) et celle de de stockage et de support des matériaux (Calvet, 2003). C'est une ressource essentielle à la production d'aliments sur la planète, puisque 95% des aliments que nous consommons y sont directement ou indirectement produits (Thiébeau et al., 2003; Baize et al., 2006). Le sol contient également des minerais (or, fer, manganèse, aluminium, phosphate) et des matériaux de construction (sable, argile, cuirasse ferrugineuse, croûte calcaire) (Calvet, 2003; Duchaufour et al., 2018). Il est à la fois un support et une source de matériaux pour la construction de bâtiments, de routes, de barrages, de canaux et de poteries; il joue en ce sens une fonction de stockage et de support des matériaux (Monnier, 1966; Calvet, 2003;

Duchaufour et al., 2018). Á travers sa position d'interface avec les autres compartiments de l'environnement (atmosphère, biosphère, hydrosphère), le sol joue un rôle important dans la régulation des grands cycles biogéochimiques à l'exemple de l'eau et du carbone (Calvet, 2003; Duchaufour et al., 2018).

Malheureusement, le sol, ce milieu aux services multiples qui s'est formé pendant plusieurs millénaires, est périssable et non renouvelable à l'échelle humaine (Burrow, 2015), or il est altéré principalement par l'Homme.

Par ailleurs, un sol de bonne qualité se remarque lorsqu'il est cultivé et que les cultures permettent de fixer le CO₂ et l'azote de l'atmosphère (Antoni et Arrouays, 2007). Un sol en bon état retient et filtre les eaux de pluie et de ruissellement (Calvet, 2003; Flanagan et al., 2017). Cependant, les activités quotidiennes de la société humaine influencent fortement cet état. Cette influence peut se faire par interventions directes. En effet, les activités humaines telles que l'agriculture intensive et industrielle, l'exploitation forestière, des exploitations agricoles et des agriculteurs qui défrichent et cultivent peuvent dégrader la qualité des sols et compromettent leur capacité de production, poussant ainsi les agriculteurs à abandonner ces sols et aller à la recherche de nouvelles terres cultivables.

1.2 Problématique

La dégradation des sols est le processus par lequel ils sont conduits vers une perte d'éléments nutritifs ou une diminution de la fertilité et de la productivité des plants (Calvet, 2003; Liniger et al., 2008). Cette dégradation peut être liée au climat et à la

végétation locale, en raison de modifications chimique, physique, biologique, socio-économique ou environnementale (Aïdoud et al., 2006; Mbayngone et Thiombiano, 2011). Les superficies des sols dégradés dans le monde ne cessent de croître (Pimentel et al., 1995). Le quart des sols dans le monde est très dégradé ou affiche une forte tendance à la dégradation, alors que 46% sont peu ou moyennement dégradés, voire en cours d'amélioration des propriétés physique, chimique et biologique (Gilles, 2011). Les activités humaines sont l'une des raisons de cette dégradation. Plus de 75% des sols étaient substantiellement dégradés par l'Humain (déboisement, compactage, surexploitation, surpâturage, travail mécanique) en 2008 (Hinimbio, 2019). Les autres causes de dégradation sont liées à l'augmentation des taux atmosphériques de gaz à effet de serre, à l'accroissement de l'érosion et de la sédimentation des sols, à l'acidification ainsi qu'à l'augmentation de la population mondiale, conduisant à la perte de surfaces cultivables (Roose, 1983; Steiner et Williams, 1996).

Pendant les années 1980, toute l'activité économique du Gabon a été basée sur l'exploitation des ressources naturelles essentiellement dans le secteur primaire (forêt, pêche, pétrole, manganèse). La branche agricole est au Gabon, le sixième pourvoyeur d'emplois dans le secteur privé. Le Gabon est toujours tributaire des importations qui couvrent environ 60% des besoins alimentaires du pays. Pour faire face à la baisse du PIB relatif au secteur agricole, le Gabon s'est lancé dans l'agriculture industrielle intensive comme la culture du cacao (*Theobroma cacao* L.) et de l'hévéa (*Hevea brasiliensis* L.) à travers le pays, qui concoure aujourd'hui à la dégradation des zones exploitées. En Afrique et particulièrement au Gabon, cette dégradation est croissante (Bagafou, 2013). Elle est liée à plusieurs facteurs comme la surexploitation des sols à vocation agricole, la fréquence des pluies, les techniques culturales sous brulis et les labours, l'utilisation d'engins pour le travail du sol et l'extraction des minerais (Bagafou, 2013; PANLCDT, 2007). C'est le cas de la zone du Nord du Gabon

particulièrement (dans le village Akam Effack situé entre les villes d'Oyem et de Bitam) où la surexploitation des sols par la culture successive du cacaoyer et de l'hévéa porte atteinte à la biodiversité souterraine. Il en résulte la baisse de productivité et des rendements des cultures, ce qui entraîne la précarité de la sécurité alimentaire et la pauvreté (PANLCDT, 2007).

1.3 Synthèse des connaissances

1.3.1 Indicateurs de dégradation des sols

En général, la dégradation des sols se caractérise sur le plan physique, biologique et chimique. La dégradation physique des sols peut être causée par la compaction, laquelle est dûe aux passages réguliers des engins lourds. La compaction des sols entraîne une augmentation de la masse volumique apparente et une dégradation de la structure du sol qui se caractérise par une réduction du diamètre moyen pondéré des agrégats ainsi qu'une diminution de la quantité de macroagrégats stables à l'eau (Angers et Simard, 1986; Battigelli et al., 2004; Poirier, 2019). La dégradation biologique des sols se matérialise par la diminution du taux de matière organique et la perturbation de l'activité de la faune, de la microfaune et des bactéries du sol (Vitousek et al., 1997). Une dégradation des propriétés chimiques peut se traduire par une perte des éléments nutritifs des sols, à cause de l'usage intensif d'engrais chimiques et de produits phytosanitaires pour lutter contre les mauvaises herbes et les parasites (Roose, 1989).

1.3.2 Technique de restauration des sols

Face à cette situation de dégradation des sols, une recherche des méthodes ou stratégies de restauration des sols appauvris s'impose. Parmi ces méthodes, il y a les méthodes traditionnelles de réhabilitation de sols dégradés qui ont recours à la jachère, à l'apport du fumier ou à la technique du Zaï (Roose et al., 1993; Rishirumuhirwa et Roose, 1998). En outre, il existe des méthodes modernes de restauration des sols. L'une d'elles est l'utilisation des plantes améliorantes. Il existe plusieurs plantes qui sont cultivées suivant la prévalence des conditions climatiques, édaphiques, socioéconomiques et ethnologiques pouvant être employés pour restaurer les sols dégradés (Roose, 1995; Saffache, 2001).

1.3.3 Éléments de bibliographie sur *Jatropha curcas*

1.3.3.1 Systématique du *J. curcas*

Le genre *Jatropha* appartient à la tribu *Jatropheae*. Il comprend environ 170 espèces connues, dont la plupart se trouvent dans des régions tempérées chaudes et subtropicales ainsi que dans les tropiques à saison sèche (Domergue et Pirot, 2008). L'Afrique compte environ 70 espèces indigènes, et Madagascar une espèce endémique (Henning, 2002). Ainsi nous avons la systématique qui suit :

Nom scientifique	<i>Jatropha curcas</i>
Nom français	Pourghère
Règne	<i>Plantae</i>
Sous règne	<i>Tracheobionta</i>
Division	<i>Magnoliophyta</i>
Classe	<i>Magnoliopsida</i>
Sous classe	<i>Rosidae</i>
Ordre	<i>Euphorbiales</i>
Famille	<i>Euphorbiaceae</i>
Sous famille	<i>Crotonoideae</i>
Genre	<i>Jatropha</i>
Sous genre	<i>Curcas</i>
Espèce	<i>ssp.</i>

Le genre *Jatropha* à plusieurs sous genre, tel que *Jatropha curcas* dont les graines fournissent une huile à usage industriel qui peut être utilisée comme biocarburant ou pour la fabrication du savon et de colorant. Il y a aussi le *Jatropha gossypifolia* dont l'huile est purgative et la racine utilisée pour soigner la lèpre. Le *Jatropha integerrima* possède une floraison rouge et sert de décoratif. Le *Jatropha multifida* (arbre corail) produit des feuilles sont consommées au Mexique. Enfin, le *Jatropha podagrica* est une plante ornementale très prisée (Martin et Mayeux, 1984 ; Makkar et al., 1998)

1.3.3.2 Origine, répartition géographique et description

Jatropha curcas est probablement originaire du Mexique ou des régions voisines d'Amérique centrale, qui sont les seuls endroits où il a été souvent collecté dans des milieux non perturbés (Makkar et al., 1998). Des navigateurs portugais l'ont introduit au Cap-Vert (Martin et Mayeux, 1984). Il est devenu une culture d'exportation qui représentait à une époque 60% de la valeur totale des exportations agricoles du Cap-Vert (Martin et al., 1984). Cette plante se retrouve du niveau de la mer jusqu'à 1000 m

d'altitude (Martin et al., 1984). Le *Jatropha curcas* s'est répandu dans le monde entier il y a longtemps et il est aujourd'hui naturalisé dans toutes les régions tropicales et subtropicales (Sepasal, 1999).

Jatropha curcas, est une espèce de plante à fleur. C'est un buisson ou un arbuste vivace à bois tendre dont la hauteur varie entre 3 et 5 mètres et pouvant atteindre 8 à 12 mètres dans des conditions optimales (Domergue et Pirot, 2008). C'est un arbuste à écorce lisse gorgé de latex, ses branches sont épaisses, cassantes et dressées à cime ouverte. Le fut est court et ramifié dès la base. Il peut vivre jusqu'à 30 à 40 ans, voire 50 ans (Martin et al., 1984 ; Fortin et al., 1997 ; Henning, 2002). Le latex translucide, s'oxyde assez rapidement à l'air et devient brun noirâtre. La plante entière laisse couler un abondant latex lorsqu'elle est meurtrie.

1.3.3.3 Écologie du pourghère

Le pourghère est une plante très tolérante des conditions climatiques et édaphiques (Martin et al., 1984). Il est présent dans les climats tropicaux semi-arides et subtropicaux chauds où les températures diurnes moyennes sont de 20°C à 30°C et la pluviométrie annuelle de 300 à 600 mm (Sepasal, 1999). Il ne supporte pas le gel, mais il résiste à des sécheresses pouvant s'étaler sur 7 mois. Comme particularité, il est capable de pousser sur des terrains marginaux et se développer sur des sols pauvres (Henning, 2002).

1.3.3.4 Caractéristiques morphologiques du pourghère

Lorsqu'il est issu d'une graine, le pourghère est doté d'un système racinaire pivot bien développé pénétrant profondément dans le sol ainsi que de quatre racines superficielles. Chez la plante issue d'une bouture il n'y a pas de racine pivot, mais plusieurs racines adventives qui sortent là où la tige a été coupée et qui sont superficielles (Domergue et Pirot, 2008 ; Henning, 2002)

Les feuilles, portées par un pétiole long de 5 à 7 cm, sont alternes, glabres, pentagonales, cordées à la base et acuminées au sommet (Domergue et Pirot, 2008; Desquibet, 2009). Le limbe est de forme variable, généralement à cinq (5) lobes plus ou moins profond, portant 5 nervures de 8 à 15 cm de large. Il est vert quelque fois panaché de jaune. Le pétiole mesure 5 à 12 cm de long. La phyllotaxie est en spirale (Burkill, 1994).

L'inflorescence est à cyme ombelliforme terminale ou axillaire. Souvent elle est en paire portant des fleurs femelles solitaires terminant chaque axe principal. Elle a des nombreuses fleurs mâles sur les rameaux latéraux en périodes chaudes (Burkill, 1994). Les fleurs sont jaunâtres et unisexuées. Les fleurs femelles se forment à partir de trois cellules elliptiques et on obtient ainsi des fleurs femelles trioovulées. On trouve parfois chez le pourghère des fleurs hermaphrodites. La floraison se fait deux fois par an (Burkill, 1994 ; Desquibet, 2009). Domergue et Pirot (1983) font remarquer que durant la floraison, il se produit un déséquilibre qui se traduit par la formation d'un plus grand nombre de fleurs femelles et que la pollinisation est faite par les insectes, principalement les abeilles. Dans les inflorescences, les fleurs femelles éclosent un ou deux jours avant les fleurs mâles ou en même temps que les fleurs mâles les plus précoces. Les fleurs mâles ne durent qu'une journée (Henning, 2002).

Le fruit est une capsule ovoïde, trilobée ou anguleuse à 3 lobes renfermant 3 graines noires à maturité, qui représentent 50 à 60% du poids du fruit, long de 3 cm et large de 10 cm (Sylla, 2006). Les fruits peuvent être produits durant toute l'année si les conditions d'humidité du sol sont bonnes et la température suffisamment élevée. Chaque inflorescence donne des grappes d'environ 10 fruits ou plus (Desauibet, 2009). Les fruits mûrs sont jaunes, les fruits secs et les coques deviennent noirs et durs, et restent sur les branches. La culture sous abris ne donne jamais de fruits à moins que les fleurs soient pollinisées manuellement (Domergue et Pirot, 2008).

Les graines ont un tégument dur, de couleur noire. Ce tégument recouvre une amande blanchâtre formée d'un albumen huileux. Le poids des graines varie de 0.50 à 0.85 gramme (Desquibet, 2009) pour une densité de 0.45 à 0.50 et la masse de 1000 graines varie de 503 à 742 g (Martin et al. 1984.). Les graines sont ovales allongées, de forme analogue à celles du raisin mais généralement plus grosses. Le pourcentage d'amande par graine entière est de 61 à 68 %. La quantité d'huile par graine est de 30 à 37 % et de 48 à 59 % par amande (Martin et al., 1984).

1.3.3.5 Phases végétatives du *J. curcas*

Les phases végétatives sont les différentes étapes que franchissent les plantes tout le long de leur cycle de vie. Plusieurs phases interviennent dans la vie d'une plante. Elles sont souvent régulées par des variations saisonnières, comme la disponibilité en eau, la température de l'air et la longueur du jour (Domergue et Pirot, 2008; Desquibet, 2009). La germination correspond à la levée des graines et est favorisée par des facteurs variables comme la disponibilité en eau, la lumière et la chaleur. La croissance est la

période durant laquelle la plante croit; on assiste ainsi à une augmentation de poids, de hauteur ou de diamètre de la plante durant cette phase (Martin et al., 1984). Les feuilles poussent rapidement pour accumuler des réserves nutritives destinées à la survie de la jeune plante. La maturité se remarque lorsque la pousse des feuilles ralentit et quand la floraison commence. La floraison est la phase où les réserves servent surtout à favoriser la production de fleurs et la reproduction (Martin et al., 1984; Domergue et Pirot, 2008; Desquibet, 2009). La formation des graines se produit lorsque les fleurs fertilisées évoluent en fruits contenant des graines qui mûrissent et se dispersent.

1.3.3.6 Récolte du pourghère

Le pourghère n'étant pas très grand, on peut directement cueillir les fruits mûrs sur les branches. La récolte et la séparation des graines et des fruits s'effectuent à la main. Les meilleurs cueilleurs peuvent récolter environ 30 kg de fruits à l'heure, ce qui représente environ 18 kg de graines (Martin et al., 1984; Burkill, 1994). Comme les fruits demeurent assez longtemps sur les branches, il faut les cueillir ou les gauler avec un bâton. Les graines qui sont dans les capsules ont encore une teneur en eau importante. Les graines du pourghère peuvent produire jusqu'à 60% d'huile (Sangare, 1989).

1.3.3.7 Rendement du pourghère

La production annuelle de graines sur les plantes adultes issues de graines peut aller de 300 g à 6 kg, en fonction des conditions de culture et de la capacité inhérente de production (Henning, 2002). Les données fournies par les plantations pilotes montrent les rendements suivants en tonnes de graines par ha : 0.5 tonnes dans l'année qui suit la plantation au champ, de 1.2 à 1.5 tonnes la deuxième année et jusqu'à 2.5 à 3.0 tonnes à partir de la cinquième année, lorsque la plantation est en pleine production. Des rendements de 5 tonnes de graines par ha, soit l'équivalent de 1.6 à 2.0 tonnes d'huile plus 3.0 à 3.4 tonnes de tourteau, ont été déclarés pour des plantations de pourghère bénéficiant de conditions agroécologiques optimales (Sangaré, 1989). Des haies anciennes et denses dans les villages ou les villes peuvent produire 2 kg de graines par mètre linéaire et par an pour des plants d'une hauteur de 5 à 6 m plantés dans un bon sol et recevant environ 800 mm de pluviométrie annuelle. Les haies taillées autour des jardins et des champs ne produisent pas plus de 0.8 kg de graines (Sangaré, 1989).

1.3.3.8 Importance économique du pourghère

On ne dispose pas encore de statistiques officielles sur les zones de plantation ou sur la production. Depuis peu, *J. curcas* a fait l'objet d'importants programmes de plantation dans plusieurs pays tropicaux à cause de son potentiel comme plante à biocarburant peu exigeante sur le plan agroécologique (Desquibet, 2009). Mais la plupart en sont encore à la phase pilote et ne dépassent probablement pas cent mille hectares au total.

Les pays d'Afrique tropicale qui ont d'importants projets de développement de la production de biocarburant à base de pourghère sont le Mali, le Burkina Faso, le Ghana, la Tanzanie, le Malawi, la Zambie et Madagascar. La longueur totale des haies de pourghère en Afrique tropicale est estimée à 75 000 km, soit un rendement potentiel de 60 000 tonnes de graines par an (Francis *et al.*, 2005). Le prix des graines de pourghère varie entre les pays. Lorsqu'elles servaient à la fabrication de savon (Mali, Tanzanie), le prix au kilogramme avoisinait 0.10 US\$. Mais quand la demande en graines pour le biocarburant aura augmenté, les prix vont monter. En Inde, on s'attend à ce que le prix au litre de carburant à base de pourghère soit fixé à 0.40 US\$ pour refléter le prix coûtant plus une modeste marge bénéficiaire. À ce prix, il faut ajouter les taxes et déduire la valeur des certificats de crédit carbone (Francis *et al.*, 2005).

1.3.3.9 Maladies et ravageurs du pourghère

J. curcas est rarement attaqué par les maladies, cependant des maladies fongiques causées par l'*oidium* et des *Alternaria* peuvent endommager les feuilles et les fleurs et provoquer une chute des feuilles (Grimm, 1999). En dehors de ces contraintes, s'ajoutent certainement les dommages dus aux maladies virales du pourghère. Sylla (2006), au cours de ses observations hebdomadaires, a rencontré certains ennemis et ce, en fonction des phases phénologiques des plants. Ces ennemis sont les termites, les chenilles, les sauterelles, les milles pattes, les chrysomélidés, les punaises et les cicadelles. Les attaques se font sur tous les organes des plants, des racines aux fruits passant par les feuilles et la tige. Mais il faut signaler que les attaques les plus importantes sont causées par les termites et se font pendant les périodes de sécheresse (Sylla, 2006).

Les termites du genre *Bellicositermes* attaquent le plant à partir de son système racinaire. Celui-ci réagit automatiquement. Les feuilles se fanent et tombent. Les branches se déshydratent et deviennent blanchâtre. La plante finit par se dessécher complètement et tombe. Mais cette mort est réversible, il suffit que les conditions deviennent favorables pour que la plante reprenne vie par marcottage. C'est donc dire que les termites ne peuvent que retarder la production (Sylla, 2006). Il faut signaler que ces termites peuvent attaquer à tout moment, aussi bien en période d'humidité que de sécheresse.

Aussitôt après leurs naissances, les chenilles dotées d'un robuste appétit, elle commence à dévorer les feuilles à sa portée, laissant sur le limbe des découpures caractéristiques, trace de ses multiples repas. Grâce à un substantiel régime, elle ne tardera pas à grandir en subissant plusieurs mues (Marche-Marchard, 1969; Sylla, 2006). Des chenilles de l'espèce *Spodoptera litura* se nourrissent des feuilles, et plusieurs espèces de coléoptères se nourrissent des feuilles des jeunes plantes. Ces ravageurs peuvent également affecter les plantes cultivées en association avec le pourghère. C'est une plante-hôte facultative pour les virus du manioc, et elle ne doit donc pas être plantée comme haie autour des champs de manioc (Samaké, 1995 ; Grimm, 1999).

Des petits criquets et des sauterelles s'attaquent aux feuilles des jeunes plantules. Ils attaquent de façon isolée. Leurs traces sont très visibles malgré qu'ils aient une faible densité. Après leur attaque, la plante laisse apparaître des feuilles déchirées, rongées et trouées (Sylla, 2006).

Dans les plantations de N'Tiguina au Mali, les milles pattes et particulièrement l'iule attaquent les jeunes plantules au niveau du sol. Dans le sol, ils s'introduisent dans la jeune tige non encore rigide et mangent tout son contenu. La jeune plantule flétrie, se courbe, se dessèche et meurt (Sylla, 2006).

1.3.3.10 Entretien d'une plantation de pourghère

Dans les nouvelles plantations, les pratiques culturales sont le désherbage et la taille. Les plants fraîchement mis en terre doivent être protégés des ruminants, car ils n'ont pas encore synthétisé de toxines répulsives dans leurs feuilles et leurs pousses. La taille débute 3 à 4 mois après la plantation au champ, afin d'induire une charpente, pour obtenir une floraison et une fructification plus abondantes. La taille d'entretien des arbustes adultes vise à induire la croissance de nouveaux rameaux latéraux et à restreindre la pousse en hauteur pour faciliter la récolte (Rajore *et al.*, 2002).

Dans le cas des haies protectrices, une taille régulière est nécessaire pour réduire l'ombrage sur les cultures avoisinantes. Les besoins en nutriments du pourghère dans l'optique d'une production maximale en huile ne sont pas encore bien définis, mais c'est une plante qui semble réagir particulièrement bien aux engrais organiques, notamment les coques de fruits compostés et tourteaux de graines. La litière de feuilles et les résidus de taille de la plantation contribuent également à l'amélioration de la teneur en matière organique du sol (Henning, 2002). Des apports en N, P et K dans le trou de plantation favorisent l'établissement précoce et la croissance rapide des nouvelles plantations.

1.3.3.11 Utilisation du pourghère pour cette thèse (*Jatropha curcas* L.)

Deux raisons majeures justifient l'utilisation du pourghère pour restaurer les sols dégradés. D'abord, par ses racines pivotantes, le pourghère permet de réhabiliter les

sols dégradés en prélevant les éléments nutritifs lessivés en profondeur et en les ramenant à la surface par la production d'une litière s'accumulant sur le sol (Brittaine et Litaladio, 2010). De plus, bien qu'il ne fasse pas partie de la famille des légumineuses, le pourghère a la capacité de fixer l'azote atmosphérique dans le sol par le biais d'une association entre ses racines et des bactéries du genre *Enterobacter* (Madhaiyan et al., 2013). Il présente l'avantage de reconstituer une litière par la chute importante de ses feuilles, due à la sécheresse qui s'observe généralement entre deux saisons des pluies. La chute des feuilles favorise ainsi l'augmentation de la teneur en carbone et matière organique des sols (Danlos, 1994). Il améliore également l'infiltration de l'eau de pluie lorsqu'il est planté en lignes pour former des diguettes (muret).

Le pourghère produit une graine dont la concentration en huile se situe entre 30 et 40% (Martin et Mayeux, 1984). Le tourteau obtenu après extraction de l'huile de ses graines est riche en protéines (58 à 64 %) et en azote (3,2 % à 3,8 %, sensiblement égale à celle des fientes de volaille) ; c'est un bon fertilisant qui peut servir comme engrais organique (Aerts, 2008; Heller, 1996; Juillet et al., 1955; Moreira, 1970; Munch et Kiefer, 1986; Silveira, 1934). Son huile est un biocarburant qui est une alternative au gasoil, pouvant être utilisée comme carburant pour les motopompes, les groupes électrogènes et même dans les moteurs de voitures (Aerts, 2008; Heller, 1996; Lutz, 1992). Au Mali, l'huile issue des graines du pourghère entre traditionnellement dans la production de savon. Le pourghère est aussi utilisé à des fins médicinales. On l'utilise pour expulser les parasites intestinaux et traiter les rhumatismes ainsi que certaines infections dermatologiques, son huile permet de soigner la lèpre (Record, 2012), et son latex est utilisé pour soigner les blessures et les plaies (Villegas et al., 1997) et traiter les douleurs dentaires (Kirtikar et Basu, 1980). Le pourghère est également utilisé dans

la confection des enclos pour la claustration des animaux en évitant ainsi leur divagation (Domergue et Pirot, 2008; Joker et Jepsen, 2003).

1.3.4 Multiplication, développement et croissance du pourghère

Selon Domergue et al. (2008), la multiplication du *J. curcas* peut s'effectuer par graine (multiplication sexuée) ou par bouture (multiplication végétative). Les graines sont semées au début de la saison des pluies (septembre et octobre). Un trempage pour humidifier les graines pendant la nuit améliore la germination (Yossi et al., 2006). Dans de bonnes conditions de température (entre 19 et 24°C) et d'humidité (60% et plus), les graines germent en une dizaine de jours. Le *J. curcas* se multiplie aussi par bouturage de branches découpées en bouture d'une longueur d'environ 25 à 30 cm et comportant au moins 4 nœuds. Les boutures sont plantées directement au champ au début de la saison des pluies. En pratique paysanne au Sénégal, les boutures sont coupées de juin à septembre (Barbier et al., 2012).

Le taux de germination (TG , %) des graines ou de reprise des boutures est le pourcentage de graines germées ou reprise de boutures par rapport au total de graines ou de boutures semées et qui varie d'un génotype à un autre. Le temps d'obtention de 50% de germination (T_{50} , jours) des graines et de levée des boutures représente le temps requis pour que la moitié des graines ou des boutures semées aient germé. La durée de reprise (DR , jours) est le nombre de jours qui séparent la première et la dernière reprise des boutures et la première et la dernière germination des graines pendant la période d'observation. Le temps de latence (TL , jours) est le nombre de jours qui s'écoulent entre la mise en terre et l'apparition du premier bourgeon pour les boutures et de la

première feuille pour les graines. La profondeur de semis est la distance utilisée pour enterrer les graines ou les boutures. La profondeur de prélèvement des sols est la distance choisit pour prélever les sols avant les analyses.

La germination du *J. curcas* est suivie du développement de l'axe principal, des feuilles et du système racinaire. La croissance est favorisée, comme pour beaucoup de plantes, par l'humidité du sol, sa fertilité, et une température élevée (Domergue et al., 2008). Ces bonnes conditions entraînent un développement arborescent plus rapide de la plante. Les espacements utilisés dans les plantations du *J. curcas* les plus courantes sont de 2 m x 2 m (2 500 arbres ha⁻¹), 2 m x 3 m (1 700 arbres ha⁻¹) et 3 m x 3 m (1 111 arbres ha⁻¹) (Domergue et al., 2008).

La compétition se déroule soit au-dessus du sol impliquant principalement une seule ressource, la lumière, ou en-dessous du sol impliquant plusieurs ressources différentes et l'espace (Casper et Jackson, 1997). En ce qui concerne la compétition en dessous du sol, il n'y a que les racines qui englobe une grande quantité de ressources telles que l'eau et une vingtaine de minéraux essentiels qui diffèrent au niveau de leur taille moléculaire, valence, niveau d'oxydation et mobilité dans le sol (Casper et al., 1997; Poitras Larivière, 2007).

La technique de multiplication influence non seulement le développement des parties aériennes de la plante, mais aussi celui des racines (Noulèkoun et al., 2018). Les connaissances sur le développement du système racinaire du *J. curcas* demeurent toutefois moins vulgarisées. Les travaux de Noulèkoun et al. (2018) montrent que la biomasse racinaire du *J. curcas* représente 25 % de la biomasse totale, 15 mois après le semis des graines au champ. Les feuilles du pourghère, qui se renouvellent naturellement tout au long de sa croissance et de son développement, s'accumulent à

la surface du sol et apportent de la matière organique au sol (Danlos, 1994; De Souza et al., 2017). Aussi, la fixation de l'azote par ses racines (De Souza et al., 2017; Madhaiyan et al., 2013) permettra d'enrichir le sol.

La culture du *J. curcas* enrichit la rhizosphère (Chaudhary et al., 2012 ; Koranda et al., 2011) et améliore la concentration en carbone organique du sol (Wani et al., 2012; Ogunwole et al., 2008) grâce à l'intense activité microbienne qui s'y déroule (Bazongo et al., 2021; Bazongo et al., 2015). Cette amélioration serait liée à l'augmentation de la biomasse microbienne du sol qui résulte de la chute abondante des feuilles et des tiges de *J. curcas* (Anguessin et al., 2021; Massoukou Pamba et al., 2022), qui favorise les mécanismes de séquestration du C organique du sol. La biomasse constituée à la suite de la chute des feuilles de *J. curcas* serait riche en carbone organique (Atchada et al., 2018; Lawrey, 1977; Leye et al., 2009; Singh et al., 2013b) et contribuerait à augmenter la concentration en C organique du sol (Gbemavo et al., 2014; Wani et al., 2012).

Bazongo et al. (2015) ont conclu à travers leur étude réalisée au Burkina Fasso que la culture du *Jatropha curcas* améliore la teneur en N du sol, grâce à la chute des feuilles (Jamil et al., 2009; Gbemavo et al., 2014; Dieye et al., 2016; Massoukou Pamba et al., 2022). Ces derniers estiment que les feuilles de cette espèce sont particulièrement riches en N par rapport aux autres parties de la plante, ce qui facilite ainsi leur décomposition par les microorganismes du sol et l'accumulation conséquente de N dans la partie supérieure du profil du sol. La culture de *J. curcas* améliore la concentration de l'N dans le sol et particulièrement dans la fraction des microagrégats (Ogunwole et al., 2008). Les racines du *J. curcas* peuvent être colonisées par des bactéries endophytes fixatrices d'azote (Madhaiyan et al., 2013). Le *J. curcas* est une espèce qui pourrait former une association symbiotique avec des champignons mycorhiziens à arbuscules (Singh, 2006), cette association symbiotique est fixatrice

d’N dans le sol (Benbrahim et al., 2014; Massoukou Pamba et al., 2023). Wani et al. (2012) déclarent qu’il y a une forte activité microbienne dans les sols sous culture de *J. curcas*, or selon Massoukou Pamba et al. (2023) l’activité microbienne dans le sol favorise le mécanisme de fixation de l’azote dans le sol.

La culture du *J. curcas* sans amendements dans les sols tropicaux diminue l’acidité du sol (Kumar et Goshal, 2017; Silva et al., 2016). Il existe peu d’études qui décrivent les mécanismes par lesquels la culture du *J. curcas* pourrait augmenter le pH du sol et réduire son acidité. Cependant, on soupçonne un lien avec la chute des feuilles car les études de Ritchie et Dollison (1985) et Butterly et al. (2021) ont déduit que l’ajout des feuilles au sol a la capacité d’augmenter le pH du sol.

Cette thèse a le potentiel d’avoir une portée scientifique très intéressante et pertinente compte tenu d’abord de l’importance qu’occupent les sols tropicaux dans le monde. En Afrique tropicale, les thématiques de restauration des sols sont très peu abordées. Après toutes exploitations intensives, dont certaines peuvent atteindre 50 ans, les sols sont abandonnés à eux-mêmes au profit d’autres espaces. Il existe donc peu de données dans la littérature scientifique qui portent sur la restauration des sols tropicaux en Afrique. La littérature scientifique qui démontre que le pourghère peut croître sur un sol dégradé à la suite d’une surexploitation agricole est quasi inexistante. Enfin, il manque également des données reliant l’effet de la densité de plantation sur les caractéristiques agronomiques des sols.

1.4 Objectifs et hypothèses

1.4.1 Objectif général

L'objectif général de cette étude est : améliorer, grâce à la culture du pourghère, certaines propriétés physiques, chimiques et biologiques d'un sol dégradé par la surexploitation à la suite des cultures intensives et successives de cacaoyers et d'hévéas.

1.4.2 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques poursuivis par ce travail sont :

Objectif 1 : Déterminer le meilleur mode de multiplication du *J. curcas* (sexué ou végétatif) et le meilleur mode de semis (direct ou en pépinière), selon qu'on utilise les graines ou les boutures ;

Objectif 2 : Evaluer la capacité du *Jatropha curcas* à croître sur un sol tropical dégradé à la suite de la culture intensive de cacaoyer et d'hévéas ;

Objectif 3 : Evaluer le potentiel du *Jatropha curcas* à améliorer le carbone (C) l'azote (N) et le pH du sol.

1.5 Hypothèses de recherche

Au regard de ce qui précède, nous souhaitons vérifier les hypothèses suivantes :

Hypothèse 1 : La multiplication avec des boutures permet d'obtenir une meilleure durée de reprise, une meilleure croissance en hauteur, un meilleur taux de reprise et un meilleur taux de survie du *Jatropha curcas* que la multiplication à l'aide des graines. Ceci sera causé par un temps de latence et des mécanismes de dormance plus court pour les boutures que pour les graines.

Cette hypothèse sera testée afin de répondre à l'objectif 1

Hypothèse 2 : La croissance en hauteur, le diamètre au collet et la production foliaire du *Jatropha curcas* sont plus importants lorsque qu'il est cultivé avec les boutures qu'avec les graines. Ceci s'explique par le fait que le développement végétatif des plants issus des boutures est plus important que celui des plants issus des graines.

Cette hypothèse sera testée afin de répondre à l'objectif 2.

Hypothèse 3 : Elle est constituée de trois sous-hypothèses. (H3.1) Après trois ans de culture de *J. curcas*, les concentrations en C organique et en N total du sol ainsi que le pH du sol seront plus élevés qu'avant la plantation. (H3.2) Ces améliorations seront plus accentuées en surface (0-10 cm) qu'en profondeur (10-20 cm) dans le sol et (H3.3) seront plus importantes à une densité de plantation plus élevée. Ceci s'explique par le fait que le *Jatropha curcas* aura emmagasiné du carbone et de l'azote par les différentes activités se déroulant sous la rhizosphère en association avec les racines.

Cette hypothèse sera testée pour atteindre l'objectif 3.

CHAPITRE 2

LE SEMIS EN POTS PERMET DE MIEUX IMPLANTER LE *JATROPHA CURCAS* L. EN MILIEU TROPICAL HUMIDE.

Renaud MASSOUKOU PAMBA^{1,2}, Vincent POIRIER^{2*}, Terence EPULE EPULE²,
Pamphile NGUEMA NDOUTOUMOU³.

¹ Ministère des Eaux et Forêts, de la Mer, de l'Environnement, chargé du Plan d'Affectation des Terres. Libreville (Gabon).

² Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. Québec (Canada), Laboratoire de l'Unité de Recherche et Développement en Agriculture et Agroalimentaire de l'Abitibi-Témiscamingue.

³ Institut de Recherches Agronomiques et Forestières. Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique. Libreville (Gabon). Laboratoire de Biotechnologies Végétales. Département d'Agronomie Générale.

* Auteur correspondant Vincent Poirier : vincent.poirier@uqat.ca, Tél : +18197620971 #5912

Soumis dans la revue *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* (BASE), le 08 septembre 2023, cet article est actuellement en révision.

2.1 Résumé

Description du sujet.

La présente étude traite de la multiplication sexuée ou végétative du *Jatropha curcas* en semis direct ou en pépinière sur un sol pauvre au Nord du Gabon.

Objectifs

Notre objectif était de déterminer la meilleure méthode de multiplication pour implanter un système agricole à base de *J. curcas*.

Méthode

Deux expériences distinctes ont été réalisées avec les graines et les boutures, l'une en pot et l'autre en plein champ. La détermination du temps de latence, de la durée de reprise, du taux de germination et la croissance juvénile du *J. curcas* a été réalisée grâce à des équations et à l'utilisation des modèles linéaires à effet mixte et généralisé avec le logiciel R.

Résultats

La germination est plus lente pour les boutures que pour les graines dans les deux expériences. Le taux de germination est de 97% pour les graines et 94% pour les boutures en semis en pot, contre respectivement 5% et 1,4% en semis direct. La hauteur et le diamètre au collet des plantules varient suivant l'effet combiné du temps et du

type de matériel végétal avec la même probabilité de 0,001. La production foliaire des plantules varie suivant le temps ($P < 0,001$) et suivant le type de matériel végétal ($P < 0,001$).

Conclusion

Pour la multiplication du *J. curcas*, les boutures sont recommandées lors du semis en pots alors que les graines le sont plutôt pour le semis direct. Il est donc préférable de multiplier les semences dans des pots où les performances sont meilleures qu'en semis direct.

Mots-clés : *Jatropha curcas* L., graines, boutures, durée de reprise, temps de latence, taux de germination, croissance juvénile

Abstract

Subject description.

The present study deals with the multiplication of *Jatropha curcas* in pot and direct seeding on nutrient-poor soil in northern Gabon.

Objective

Our objective was to determine the best propagation method for establishing a *J. curcas* system.

Method

Two separate experiments were carried out, one in pots and the other in open fields sown with seeds and cuttings. Determination of the latency time, recovery time, germination rate and juvenile growth of *J. curcas* was carried out by means of equations and the use of linear mixed-effect and generalized models with the software R.

Results

Germination was slower for cuttings than for seeds in both experiments. The germination rate was 97% for seeds and 94% for cuttings in pot sowing, compared with 5% and 1.4% respectively in direct sowing. Seedling height and collar diameter varied according to the combined effect of time and type of plant material, with the same probability of 0.001. Leaf production of seedlings varied with time ($P < 0.001$) and with type of planting material ($P < 0.001$).

Conclusion

For *J. curcas* propagation, cuttings are recommended for sowing in pots, whereas seeds are more suitable for direct sowing. However, it is preferable to multiply seeds in pots, where performance is better than with direct sowing.

Keywords: *Jatropha curcas* L., seeds, cuttings, recovery time, lag time, germination rate, juvenile growth

2.2 Introduction

Le pourghère (*Jatropha curcas* L.) est un arbuste de la famille des Euphorbiaceae originaire d'Amérique centrale (Achten et al., 2010; Sunil et al., 2013; Sunil et al., 2009). Sa taille est généralement entre deux et huit mètres de hauteur (Sunil et al., 2013), mais peut atteindre 12 mètres (Domergue et al., 2008). Le *J. curcas* est une plante plastique qui s'adapte à de nombreuses conditions écologiques (Labo et al., 2016; Nguema Ndoutoumou et al., 2013), notamment en raison de sa résistance à la sécheresse (Domergue et al., 2008). Elle est utilisée à diverses fins, notamment (i) en médecine traditionnelle pour traiter plusieurs problèmes de santé (De Souza et al., 2017; Touckia et al., 2015b; Zima et al., 2018), (ii) comme haies vives pour lutter contre la divagation des animaux (Bazongo et al., 2015; Minengu Mayulu, 2014), (iii) pour la fabrication du biocarburant (Ahoton et al., 2011) et (iv) les extraits issus de la graine et de la feuille de *J. curcas* ont des propriétés fongicides et insecticides (Adamou et al., 2020; Nguema Ndoutoumou et al., 2015; Schmelzer et Gurib-Fakim, 2008). En outre, le *J. curcas* est reconnu pour sa capacité à restaurer la fertilité des sols dégradés, particulièrement en milieu tropical aride (Avakoudjo et al., 2013; Sop et al., 2012). Cependant, il y a peu de connaissances sur l'implantation du *J. curcas* en milieu tropicale humide, et ce ni sur le type de matériel végétal utiliser lors de l'implantation, ni sur sa capacité de germer sur les sols pauvres.

Le *J. curcas* peut être régénéré par voie générative (graines) et par voie végétative (boutures) (Nguema Ndoutoumou et al., 2013; Ouattara et al., 2011; Yang et al., 2012). Les graines et les boutures peuvent être plantées en semis direct au champ (Diop et al., 2012 ; Nguema Ndoutoumou et al., 2013) ou en pots au sein d'une pépinière (Diop et al., 2012; Domergue et al., 2008; Medza Mve et al., 2011). À l'analyse des résultats de toutes ces études sur la germination du *J. curcas*, il ressort que (1) le taux de reprise

des boutures est plus élevé que le taux de germination des graines, (2) le taux de germination en pot est plus élevé que celui en plein champs et (3) le taux de germination des études menées dans climat tropical humide est supérieur à celui obtenu dans le climat tropical sahélien. Cependant, toutes ces études n'expliquent pas les mécanismes pouvant justifier ces résultats et il y a peu de connaissances scientifiques expliquant les raisons de ces différences sur le taux de germination du *J. curcas*.

La croissance des plants varie fortement en fonction des caractéristiques du sol et du climat (Singh et al., 2013). La régénération du *J. curcas* est fortement liée aux conditions environnementales telles que la température et la lumière (Cai et al., 2011; Gairola et al., 2011). Toutefois, les connaissances sur le mode de multiplication du *J. curcas* en milieu tropicale humide sont insuffisantes. Peu d'études scientifiques décrivent la croissance végétative du *J. curcas* sur des sols pauvres et dégradés en milieu tropical humide. Or, cette plante pourrait permettre de fertiliser les sols grâce aux résidus des cultures et à la chute de ses feuilles (Minengu et al., 2015; Pouya et al., 2020). Ainsi, le *J. curcas* pourrait permettre de reboiser et restaurer les sols dégradés, mais cela demeure peu étudié en milieu tropical humide.

À cause des différentes activités humaines telles que l'exploitation forestière et l'agriculture industrielle et intensive, les sols de la zone tropicale humide sont sujets à la dégradation (Njomgang et Tchienkoua, 1999; Komba Mayossa, 2019). La dégradation des sols cause une réduction des services écosystémiques attendus et entraîne une diminution de la qualité et de la productivité des sols (Lal, 2009, 2015). La restauration des sols tropicaux dégradés est donc une priorité mondiale pour réduire la pression sur les terres boisées, freiner la déforestation, accroître la sécurité alimentaire et réguler le climat (Clark et Nicholas, 2013; Lahmar et Ruellan, 2007; Lal, 2015). Il est donc essentiel de développer une méthode de multiplication de *J. curcas*

en milieu tropical humide afin de mettre en place des systèmes capables de restaurer la fertilité des sols dégradés.

Cette étude a pour objectif d'étudier deux méthodes de multiplication, soit par graines et par boutures, et ce en semis direct en plein champ et en pépinière sur un sol pauvre en éléments nutritifs et surexploité par la culture successive de cacaoyers et d'hévéas au Nord du Gabon. La première hypothèse est que la multiplication du *J. curcas* avec les boutures permet une meilleure durée de reprise, une meilleure croissance en hauteur, un meilleur taux de reprise et un meilleur taux de survie que la multiplication à l'aide des graines. La seconde hypothèse est que les résultats obtenus en semis en pépinière seront meilleurs que ceux en plein champ. Ceci sera causé grâce à un temps de latence plus court pour les boutures que pour les graines et des meilleures conditions de germination en pépinière qu'en plein champ. Ce travail contribuera à combler le manque de données scientifiques qui traitent de la croissance du *J. curcas* en milieu tropical humide sur les sols appauvris.

2.3 Matériel et méthodes

2.3.1 Localisation du site de l'étude

L'étude a été réalisée de septembre à novembre 2019 à 25 km de la ville de Bitam, dans la province du Woleu-Ntem au Nord du Gabon (Figure 2.1). La formation végétale dominante est la forêt humide. Selon la classification climatique de Köppen-Geiger, le climat est de type *Af*, soit de forêt tropicale humide (Geiger, 1954; Rudolf, 1961). Le

climat comporte quatre saisons réparties en fonction de l'intensité des pluies et de la sécheresse : une petite saison sèche (janvier et février) ; une grande saison des pluies (mars, avril, mai et juin) ; une grande saison sèche (juillet, août et septembre) et une petite saison des pluies (octobre, novembre et décembre). Lors de l'expérimentation, l'humidité relative de l'air était en moyenne de 92%, la pluviométrie avoisinait les 2300 mm.an⁻¹ et la température moyenne était de 28°C (Samson, 2023).

Les sols du site ont été occupés pendant plus de 43 ans par deux systèmes monocultureux industriels et successifs. Il y a d'abord eu une cacaoyère jusqu'en 1999, puis l'hévéaculture pendant 20 ans (de 1999 à 2019). D'après Massoukou Pamba et al. (2022), les caractéristiques physico-chimiques des sols du site montrent qu'ils sont relativement pauvres en C organique et en N total, avec 10.4 et 0.9 g kg⁻¹ de C organique et d'N total respectivement, et qu'ils sont riches en Al (896.3 mg kg⁻¹) et Fe (120.9 mg kg⁻¹). Ces sols contiennent 50% d'argile, 47% de sable et 3% de limon (Massoukou Pamba et al., 2022). D'après la Base de référence mondiale de ressources en sols (IUSS Working Group WRB, 2006), le sol du site d'étude est un Ferralsol car il contient une forte dominance de kaolinites et d'oxydes de Fe et Al (Chapelle, 2018).

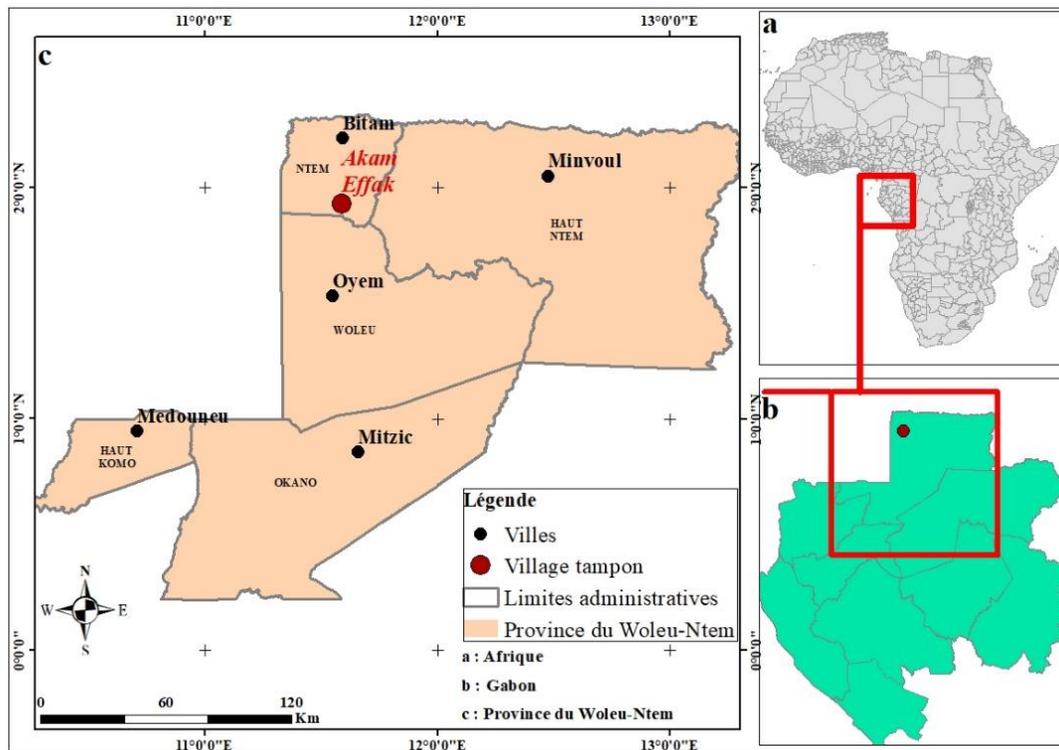


Figure 2.1 Localisation du village Akam Effak où est situé le site de l'étude.

2.3.2 Dispositifs expérimentaux

Le matériel végétal utilisé est composé des graines et des boutures du *J. curcas*, importées du Burkina Faso. Le transport du matériel végétal a satisfait aux réglementations phytosanitaires internationales et nationales en vigueur permettant le transfert d'un pays à un autre. Le matériel végétal a été placé dans des contenants sécurisés avec un système d'aération et transporter en avion pour assurer la diligence. Les graines et les boutures ont été collectées telles que décrit par Massoukou Pamba et

al. (2022). Le même lot de graines et des boutures a été utilisé pour les deux expériences décrites ci-dessous. Les outils utilisés pour réaliser cette étude sont composés d'un plantoir pour semer les graines et les boutures, un pied à coulisse pour mesurer le diamètre et la hauteur des plants avec un pied à coulisse. Une machette de marque Tramontina et une débroussailleuse de marque Sthill® ont été nécessaires pour les travaux d'entretien. Deux dispositifs expérimentaux ont été mis en place. Dans les deux cas, le matériel végétal utilisé fût trempé dans de l'eau à température ambiante durant 24 heures avant le semis pour faciliter la germination (Diallo, 2017; Domergue et al., 2008; Soumana et al., 2019). Le semis a eu lieu en saison pluvieuse pour les deux expériences, juste après les premières pluies du mois d'octobre. La première expérience vise le semis en pépinière dans des pots et la seconde se rapporte au semis en champ.

Expérience 1 Semis en pépinière dans les pots

Le dispositif expérimental est constitué de huit parcelles de 2 m x 1.2 m chacune, soit quatre parcelles pour chacun des deux types de matériel végétal. Pour les quatre parcelles semées avec les graines, il y a eu 61 pots par parcelle qui ont reçu chacun trois graines. Il y a donc un total de 732 graines semées dans 244 pots. Les quatre autres parcelles ont été semées avec les boutures comportant trois nœuds au minimum chacune et plantées sur les deux-tiers de leur longueur. Chacune des quatre parcelles semées avec les boutures est constituée de 75 pots, ce qui fait un total de 300 pots et 300 boutures. Chaque parcelle est séparée de l'autre d'un mètre pour faciliter la circulation. Les pots utilisés sont des sacs plastiques noirs en polyéthylène de 20 cm de longueur sur 20 cm de largeur et 30 cm de profondeur. Les pots furent remplis aux deux-tiers par le terreau collectés sur le site entre 0 et 20 cm de profondeur à un endroit adjacent à celui où l'expérience de semis direct a été réalisée (voir plus bas). La pépinière a été installée sous un abri naturel pour offrir de l'ombrage. L'abri est un grand manguier avec un feuillage très dense. Les précipitations naturelles ne pouvant

atteindre directement et correctement les semences, un arrosage a été effectué deux fois par jour, et a consisté à répandre de manière arbitraire environ 40 litres d'eau dont 20 litres le matin et 20 litres également le soir dans chacune des 8 parcelles à l'aide d'un arrosoir mécanique. Ainsi, chaque pot a reçu l'équivalent d'environ 15 mm de pluie par arrosage chaque jour. Un désherbage régulier a été effectué dans les pots pour éviter la compétition avec les mauvaises herbes. Il n'y a pas eu d'apport d'engrais.

Expérience 2 Semis direct en plein champ

Le dispositif expérimental mis en place pour l'expérience de semis direct est identique à celui décrit par Massoukou Pamba et al. (2022). Il est constitué de 4 blocs de 126 m x 36 m chacun et espacé de 10 m les uns des autres. Dans chaque bloc, il y a 6 parcelles de 12 m x 12 m recevant les traitements (graines et boutures) selon trois modalités d'écartements, soit 2 m x 2 m, 2.5 m x 2.5 m et 3 m x 3 m. Ces modalités d'écartements ont été mise en place pour évaluer plus tard leur effet sur la productivité du *J. curcas* et la capacité de fertilisation du sol. Dans cette étude, l'effet de l'écartement n'a pas été testé car pour la germination et la croissance des plantules cet effet est négligeable. Le dispositif expérimental est construit selon un plan d'expérience en blocs complets aléatoires et totalise 24 parcelles. L'attribution du matériel végétal à l'intérieur de chaque bloc s'est faite de manière complètement randomisée. Dans un bloc, il y a 61 poquets contenant 3 graines chacun, donc 183 graines par bloc et 732 graines au total. Pour les boutures, dans un bloc il y avait 61 poquets contenant 1 bouture, donc 61 boutures par bloc pour un total de 244 boutures. Il n'y a eu aucun arrosage car deux jours avant le semis, les premières pluies avaient commencées et ont été fréquentes sur quasiment deux semaines. D'après Samson (2023), il y a eu 21 mm de précipitations en moyenne par jour pour le mois d'octobre 2019 dans la ville de Bitam. Ces précipitations naturelles abondantes ont servi à alimenter les semis en plein champ.

Une fois par mois, un désherbage manuel à l'aide d'une machette a été effectué en rond de 40 cm de rayon autour de chaque plante pour éviter la concurrence avec les mauvaises herbes. A l'aide d'une débroussailleuse mécanique une coupe des mauvaises herbes entre les allées et entre les parcelles a été faite une fois tous les deux mois sur l'ensemble du dispositif expérimental.

2.4 Mesure des paramètres de germination et de croissance juvénile

Dans les deux expériences, les données concernant la germination des graines et la reprise des boutures ont été collectées tous les jours pendant 60 jours à partir du semis. Le taux de germination (TG , %) des graines ou de reprise des boutures est calculé grâce à la formule suivante :

$$TG = \frac{Ng}{Ns} \times 100 \quad (\text{Éq. 1})$$

Où Ng représente le nombre de graines ou de boutures germées et Ns le nombre de graines ou de boutures semées. Le temps d'obtention de 50% de germination (T_{50} , jours) des graines et de levée des boutures représente le temps requis pour que la moitié des graines ou des boutures semées aient germé et a été calculé grâce à la formule de Farooq et al. (2005) :

$$T_{50} = \frac{t_i + \left\{ \left[\frac{N}{\left(\frac{100}{50} \right)} \right] - n_i \right\} (t_j - t_i)}{(n_i - n_j)} \quad (\text{Éq. 2})$$

Où N est le nombre final de graines germées, et n_i et n_j sont le nombre total de graines germées aux temps t_i (date de la première germination) et t_j (date de la dernière germination). La durée de reprise (DR , jours) se calcule en comptant le nombre de jours qui séparent la première (t_i) et la dernière (t_j) reprise des boutures et la première et la dernière germination des graines pendant la période d'observation. Le temps de latence (TL , jours) est déterminé en comptant le nombre de jours qui s'écoulent entre la mise en terre et l'apparition du premier bourgeon pour les boutures et de la première feuille pour les graines. La croissance en hauteur (H , en cm) a été déterminée en mesurant la distance entre la surface du sol et le premier bourgeon à l'aide d'un mètre ruban. Le diamètre au collet (D , en cm) a été déterminé en mesurant le diamètre de la tige à 3 cm du sol à l'aide d'un pied à coulisse. Les mesures de croissance en hauteur et au collet ont été évaluées sur tous les plants marqués (voir plus bas) tous les jours à partir du dixième jour suivant la germination et ce pendant deux mois. Le nombre de feuilles (Fnb) est dénombré quotidiennement pendant deux mois sur les mêmes plants marqués pour mesurer H et D .

Durant l'expérience en pépinière, cinq plants par bloc et par type de matériel végétal choisis arbitrairement ont été marqués et ont servi pour la prise des mesures. Les mesures de H et D ont été effectuées une semaine après la levée des graines et la reprise des boutures. Durant l'expérience en plein champ, cinq plants issus des graines et des boutures ont été marqués dans chacune des parcelles pour prendre les mesures de H et D . Un désherbage régulier a été effectué dans la plantation pour éviter la compétition avec les mauvaises herbes. Il n'y a eu aucun apport d'engrais.

Pour les deux expériences, les observations ont commencé le 10^{ème} jour. Ce temps d'attente correspond à la période de distinction entre les feuilles et la tige (Rutishauser, 1995), c'est à dire de la reprise des boutures et de la levée des graines.

2.5 Analyse statistique

Les deux expériences réalisées ont été analysées indépendamment l'une de l'autre. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R 4.0.2 (R Core Team, 2018). Au total trois types d'analyses par expérience ont permis de suivre la germination et la croissance de *J. curcas*. Pour les paramètres de germination, une analyse statistique descriptive a été appliquée et le package *SeedCalc* de R a été utilisé pour calculer les paramètres de germination tels que le TG (Éq. 1), le T_{50} (Éq. 2) et le TL . Pour les paramètres de croissance, des analyses statistiques comparatives ont été effectuées. Les postulats de l'analyse de la variance (ANOVA) ont été testés sur chacune des variables H et D . L'évaluation de la distribution normale des résidus a été faite avec le test de Shapiro-Wilk et celle de l'homogénéité de la variance avec le test de Levene. Les résultats de ces deux tests ne montrent qu'aucun des postulats n'était respecté et une transformation logarithmique des données a été faite afin de réaliser l'ANOVA dans les règles de l'art. Compte tenu de la nature longitudinale des données et de leurs mesures répétées dans le temps, un modèle linéaire à effets mixtes a été utilisé pour les variables H et D . Un modèle linéaire généralisé à effet mixte qui a une distribution de Poisson a été utilisé sur la variable Fnb , puisqu'elle est issue d'un comptage. Le seuil de significativité permettant de distinguer les différences entre les modalités a été fixé à 5% (i.e., $P \leq 0.05$). Les graphiques ont été réalisés avec le package *ggplot2* du logiciel R 4.0.2 pour observer l'évolution des effets des traitements sur H , D et Fnb dans le temps.

2.6 Résultats

2.6.1 Germination du *Jatropha curcas*

Expérience 1 Semis en pépinière

Les paramètres caractérisant la germination des graines et la reprise des boutures semées en pot à la pépinière sont présentés dans le Tableau 2.1. Il ressort du semis en pot du *J. curcas* que la germination des boutures semble être légèrement plus lente que celle des graines. Ils sont respectivement de 11 jours contre 10 pour la *DR*, 9 jours contre 7 pour atteindre 50% de germination (T_{50}) et 6 jours de latence (*TL*) contre 4 pour les boutures et les graines, respectivement. Cependant, le taux de germination (*TG*) des graines semble être légèrement plus élevé que celui des boutures, à savoir 97% pour les graines contre 94% pour les boutures.

Tableau 2.1 Germination des graines et des boutures de *J. curcas* semées en pot

Paramètres de germination	Boutures	Graines
Durée de reprise (<i>DR</i> , en jours)	11	10
Temps de 50% de germination (T_{50} , en jours)	9	7
Temps de latence (<i>TL</i> , en jours)	6	4
Taux de germination (<i>TG</i> , en %)	94	97

Expérience 2 Semis en plein champ

Les paramètres caractérisant la reprise des boutures et la germination des graines semées directement en plein champ sont présentés dans le Tableau 2.2. Les résultats montrent également des périodes plus lentes pour les boutures que pour les graines, à savoir 14 jours contre 10 pour la *DR* et 9 jours contre 7 pour le *TL*. En ce qui concerne le T_{50} , il n'était pas possible de l'évaluer car aucun de deux types de matériel végétal n'a atteint ce seuil. Enfin, le taux de germination est très faible et ce autant pour les graines (i.e., 5%) que pour les boutures (i.e., 1.4%).

Tableau 2.2 Germination des boutures et des graines de *J. curcas* semées en plein champ

Paramètres de germination	Boutures	Graines
Durée de reprise (<i>DR</i> , en jours)	13	10
Temps de 50% de germination (T_{50} , en jours)	Nd	Nd
Temps de latence (<i>TL</i> , en jours)	12	8
Taux de germination (TG, en pourcentage)	1.4	5

Nd : Non déterminées

2.6.2 Croissance du *Jatropha curcas*

Expérience 1 Semis en pots en pépinière

L'effet du temps et du matériel végétal sur la croissance du *J. curcas* semé dans les pots à la pépinière sont présentés dans le Tableau 2.3. Les résultats montrent que le

type de matériel végétal et le temps influencent significativement la hauteur ($P < 0.001$) et que les deux facteurs interagissent pour influencer significativement le diamètre au collet et le nombre de feuilles ($P < 0.001$).

Tableau 2.3 Effet du type de matériel végétal et du temps sur la croissance du *J. curcas* en pot

Sources de variation	Hauteur (<i>H</i>)		Diamètre (<i>D</i>)		Nombre de feuilles (<i>Fnb</i>)	
	F value	Pr > F	F value	Pr(>F)	F value	Pr(> z)
TMV*	325.3	<0.001	19.109	<0.001	824.709	<0.001
Temps	1103 x 10 ⁵	<0.001	384.506	<0.001	1272.287	<0.001
TMV:Temps	1.200 x 10 ⁻²	0.9131	18.209	<0.001	53.423	<0.001

*TMV= Type de Matériel Végétal

L'évolution de la croissance en hauteur, du diamètre au collet et du nombre de feuilles du *J. curcas* dans le temps en fonction du type de matériel végétal semé en pot est présenté à la Figure 2.2. Afin de pouvoir distinguer les feuilles des tiges, la croissance des plantules n'a été observé qu'à partir du 10^{ème} jour suivant le semis en pot. Ainsi, comme l'indique la Figure 2.2a, la hauteur des plantules semées en pots augmentent linéairement et de manière identique pour les plants issus des boutures comme pour ceux des graines pendant toute la période d'observation. Cependant, l'augmentation observée dans le temps sur le diamètre au collet et le nombre de feuilles n'est pas identique pour les deux types de matériel végétal (Fig. 2.2b et 2.2c). Au début des observations, le diamètre au collet des plantules issues des graines était légèrement plus élevé que celui des plantules issues des boutures. Mais au-delà du 20^{ème} jour, la tendance s'est inversée, le diamètre au collet des plantules issus des boutures est devenu supérieur à celui des graines et cette augmentation a continué jusqu'à la fin des observations (Fig. 2.2b). L'évolution du nombre de feuilles des plantules diffère aussi

selon le type de matériel végétal (Fig. 2.2c). Le nombre de feuilles des plantules issues des boutures est largement plus élevé que celui des plantules issues des graines pendant toute l'observation.

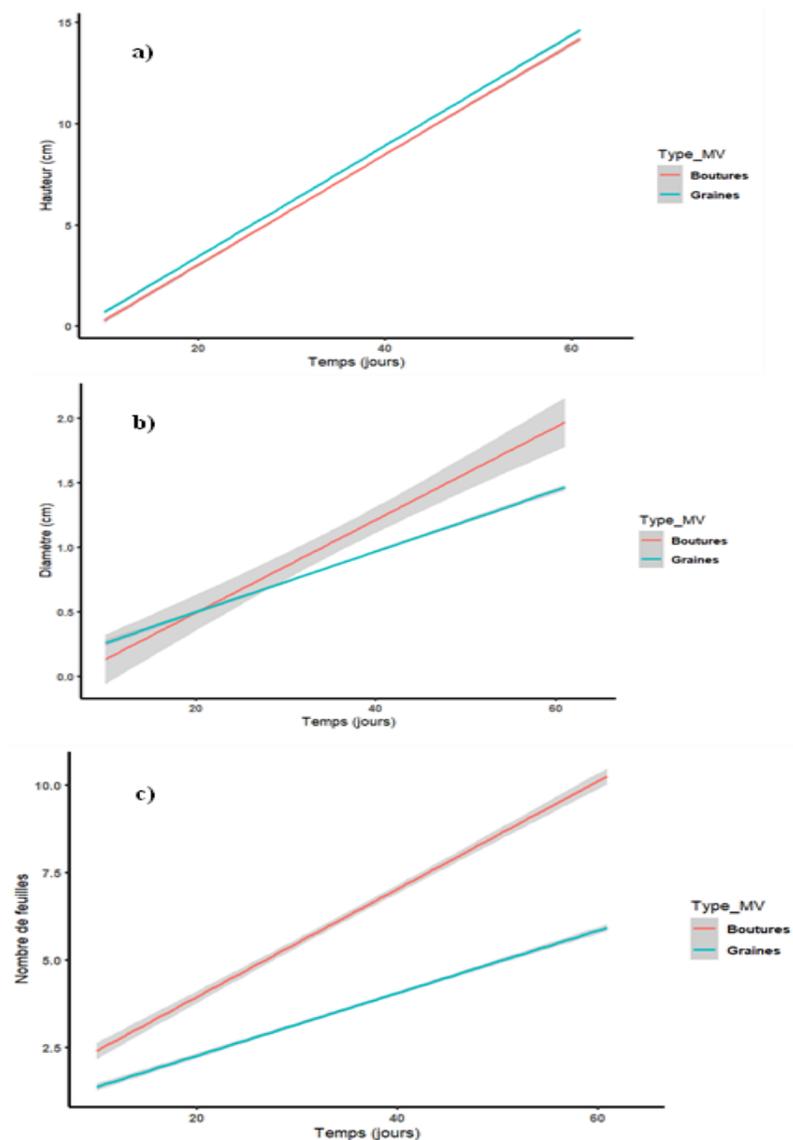


Figure 2.2 Croissance des plantules de *J. curcas* en Hauteur, Diamètre et Nombre de feuilles issues de semis en pot des graines et des boutures. La zone ombragée représente l'intervalle de confiance à 95%. À la figure 2.3a, l'intervalle de confiance est masqué par les courbes.

L'effet du temps et du matériel végétal sur la croissance du *J. curcas* semé en plein champs est présentés dans le Tableau 2.4. Les résultats montrent que le temps influence la croissance en hauteur, le diamètre au collet et le nombre de feuilles des plantules ($P < 0.001$). Il n'y a pas de différence entre la croissance des plantules issues des boutures et des graines semées en plein champs; la hauteur, le diamètre au collet et le nombre de feuilles observées sont les mêmes peu importe le type de matériel végétal. Chez les plantules ayant germé, on observe que la hauteur et le diamètre au collet croient dans le temps (Fig. 2.3a) et que le nombre de feuilles produites varie entre 1 et 5 (Fig. 2.3b).

Tableau 2.4 Effet du temps sur la croissance du *J. curcas* en plein champ.

Sources de variation	Hauteur (<i>H</i>)		Diamètre (<i>D</i>)		Nombre de feuilles (<i>Fnb</i>)	
	F value	Pr > F	F value	Pr(>F)	F value	Pr(>F)
TMV*	1.2388	0.2662	0.0690	0.7929	0.1369	0.7115
Temps	909.7262	<0.001	236.8235	<0.001	333.9368	<0.001
TMV:Temps	0.0162	0.8989	1.8385	0.1757	0	1

* TMV= Type de Matériel Végétal

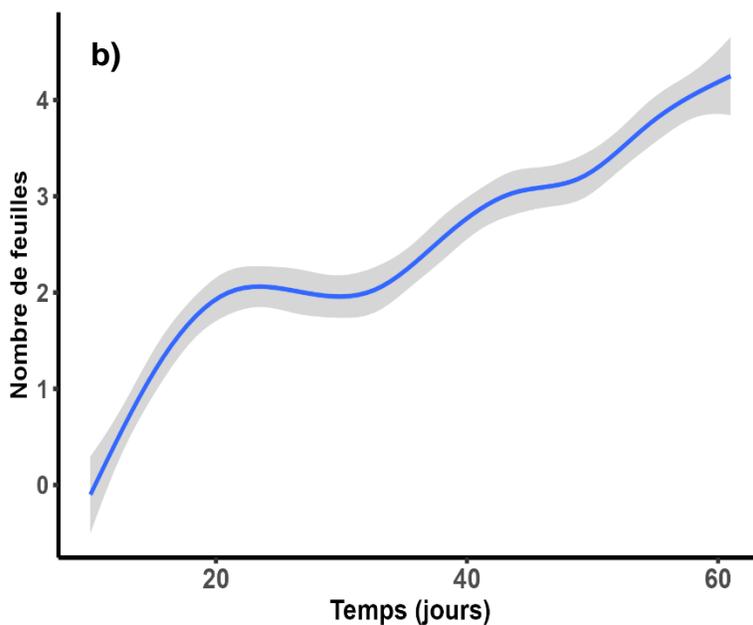
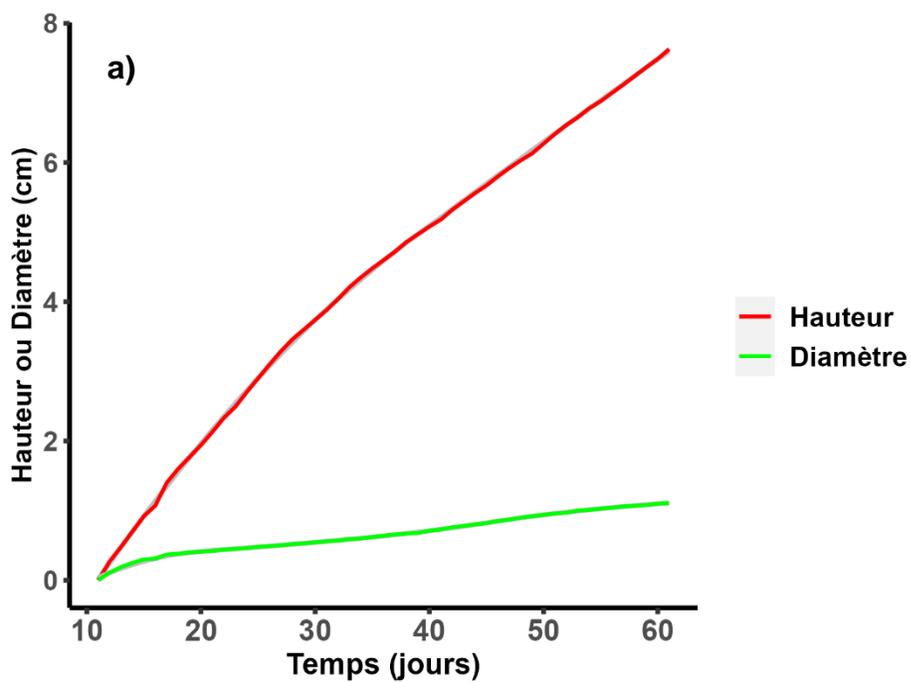


Figure 2.3 Croissance des plantules de *J. curcas* dans le temps en plein champs. La zone ombragée représente l'intervalle de confiance à 95%. À la figure 2.3a, l'intervalle de confiance est masqué par les courbes.

2.7 Discussion

2.7.1 Germination

Nos observations montrent que lorsqu'il est semé en pot, la germination du *Jatropha curcas* semble plus lente pour les boutures que pour les graines. Le temps de latence observé sur l'ensemble des pots fût de 10 jours pour les boutures contre 7 jours pour les graines, et la durée de reprise observée fût de 11 jours pour les boutures contre 10 jours pour les graines. Ces résultats concordent avec ceux de Diop et al. (2012) au Sénégal qui ont obtenu un temps de latence de 8 jours pour les boutures contre 5 jours pour les graines, ainsi qu'une durée de reprise de 15 jours pour les boutures contre 5 jours pour les graines. Ils s'arriment aussi à ceux de Touckia et al. (2015a) en Centrafrique sur un sol argileux sableux qui ont également obtenu une durée de reprises et un temps de latence avec les graines de 11 et 4 jours respectivement. Nos observations témoignent que le matériel végétal utilisé pour notre expérimentation dispose d'une bonne qualité germinative et confirment les conclusions de Domergue et Pirot (2008) selon lesquelles la période de germination du *Jatropha curcas* est de 4 semaines au maximum. La germination plus lente des boutures pourrait s'expliquer par le fait que les mécanismes de la dormance des boutures appelé débourrement qui passent essentiellement par quatre étapes, le gonflement du bourgeon, l'éclatement du bourgeon, l'apparition des ébauches d'organes foliaires et floraux et l'apparition des nervures des feuilles (De Barba et al., 2016; Rossi et Bousquet, 2014) sont plus lents que ceux des graines qui passent par trois étapes à savoir l'imbibition, le gonflement et l'éclatement. La forte activité métabolique lorsque les réserves de la graine sont

transformées afin de pouvoir être utilisées par la plantule et l'émergence de la racine (Bizouerne, 2021; Gimeno-Gilles, 2009).

Nos résultats montrent des taux de germination très élevés pour le *Jatropha curcas* semé en pots, soit 97% pour les graines contre 94% pour les boutures. Ces résultats se rapprochent de ceux obtenus dans d'autres études réalisées en pot également sous un climat tropical humide. Nguema Ndoutoumou et al. (2013) avec une température de 27°C, une humidité de l'air de 98% et 2300 mm de moyenne annuelle de précipitation ont obtenu 90% de germination pour les graines et 93% pour les boutures au sud-est du Gabon, alors que Touckia et al. (2015a) sur un sol argileux sableux avec une température de 28°C, une humidité de l'air de 65% et 1400 mm de moyenne annuelle de précipitation ont obtenu 77% de germination pour les graines en Centrafrique. Cependant, les taux de germination obtenus en pot sous un climat tropical humide semblent plus élevés que ceux obtenus sous un climat sahélien. Au Niger, avec une température moyenne de 25°C, les précipitations moyennes annuelles de 500 mm et l'humidité de l'air à 21%, Gandonou et al. (2012) ont obtenu 55% avec les graines et 62% pour les boutures. Dans ce même pays avec des conditions pratiquement identiques, Moussa et al. (2017) ont obtenu 87% et 96% de germination en semis en pot pour les graines et les boutures, respectivement. Au Sénégal, Diop et al. (2012) ont obtenu 87% de germination pour les graines et 55% pour les boutures avec 1000 mm de précipitation moyenne annuelle, 28°C de moyenne de température et 80% d'humidité de l'air. Il ressort de ces différents résultats qu'en milieu tropical la germination de *J. curcas* est meilleure lorsque l'humidité de l'air est plus élevée. En effet, si le *J. curcas* peut germer exclusivement grâce à l'humidité de l'air (Domergue et al., 2008; Sitorus, 2015), les zones où cette humidité est plus élevée serait plus favorable à la germination du *J. curcas*.

Les taux de germination observés à la suite du semis direct en plein champ sont diamétralement opposés à ceux obtenus dans les pots en pépinière. Il n'y a que 5% des graines et 1.4% des boutures qui ont germé en plein champ. Ces très faibles taux de germination pourraient s'expliquer par le fait que les graines et les boutures semées ont été asphyxiées par une trop grande quantité d'eau dans le sol. En effet, le semis direct en plein champs a été fait au début de la saison des pluies, les précipitations étaient en moyenne de 21 mm par jour. Or les plants en pot n'ont reçu environ que 15 mm par jour, c'est-à-dire 30% moins d'eau que le semis en plein champ. Ouattara et al. (2011) ont eux aussi obtenu un faible taux de germination du *J. curcas* là où la quantité d'eau était la plus élevée. Les plantules en plein champs ont reçu beaucoup plus d'eau que celles en pépinière, cet excès d'eau a des effets négatifs sur la germination et la croissance des plantes (Zhou et al., 2020); il entraîne l'asphyxie des semences et bloque la capacité d'absorption des nutriments (Sairam et al., 2008). Aussi, la température du sol en plein champ est plus élevée que celle du sol dans les pots, car l'ombrage naturel dans la pépinière crée un microclimat qui réduit la température (Collet et Frochot, 1992). En effet, on peut sentir une différence de cinq à dix degrés Celsius entre la température à l'ombre et celle en plein soleil et ce facteur peut faire une importante différence dans ce que l'on peut ressentir comme chaleur (Duranceau, 2021; Zemmouri, 2020). Or, la température affecte la germination des plantes (Reynolds et Thompson, 1973) et une température trop élevée peut avoir un impact néfaste sur la germination et la croissance du *J. curcas* (Mukherjee et Datta, 2007; Gairola et al., 2011). En somme, au regard des résultats des différentes études citées plus haut, tout indique que les conditions trop humides et trop chaudes en plein champ ont influencé négativement la germination du *J. curcas* qui y fût semé directement.

2.7.2 Croissance

La croissance en hauteur des plants issus des graines et des boutures en pot, comme celle en plein champ est continue dans le temps et ne diffère pas entre les deux types de matériel végétal. Nos résultats rejoignent ceux des travaux de Trabucco et al. (2010) et Nguema Ndoutoumou et al. (2013) réalisé en pot également, ainsi que ceux en pots de Moussa et al. (2017) au Niger qui n'ont trouvé aucune différence statistiquement significative sur la croissance en hauteur des plantules issus des graines et des boutures semés en pots. En revanche, nous avons constaté que la croissance des plantules semées en pot est plus rapide que celle en plein champ. En effet, dans le semis en pot, les conditions de température sont moins élevées qu'en plein champ où les températures trop élevées ont pu impacter négativement la croissance du *J. curcas* (Kagamgèga et al., 2019).

La croissance du diamètre au collet et la production des feuilles des plantules en semis en pot est continue dans le temps. Nos résultats sont similaires à ceux obtenus en pot par Diop et al. (2012) au Sénégal, Moussa et al. (2017) au Niger et Nguema Ndoutoumou et al. (2013) au Gabon. Cette croissance du diamètre au collet et en production des feuilles témoignent d'un bon déroulement du développement végétatif des plantules de *J. curcas*. Ces résultats témoignent que les conditions de croissance en pots sont favorables au bon développement végétatif des plantules. Les conclusions des études de Touckia et al. (2015a) en Centrafrique corroborent avec ceux de Trabucco et al. (2010) qui arguent qu'en Afrique, les zones les plus favorables au bon développement végétatif de *J. curcas* sont celles de régions tropicales humides situées au cœur du continent tel que le Gabon. La température, l'eau et le sol sont deux facteurs

particulièrement importants pour la germination et le développement des plantes (Gairola et al., 2011; Villeneuve et al., 2006).

Toutefois la croissance du diamètre au collet et la production des feuilles varient selon le type de matériel végétal semé en pots. La croissance est meilleure pour les plantules issues du bouturage par rapport à celles issues des graines et c'est certainement lié aux réserves contenues dans les boutures (Domergue et Pirot 2008). En effet, Feldmann et Heyt (2002) expliquent que les boutures sont moins exigeantes que les graines pour se développer, car elles contiennent des réserves en éléments nutritifs plus élevées qui favorisent le développement des plantes.

2.8 Conclusion

Cette étude est constituée de deux expériences distinctes et a consisté à analyser la germination du *J. curcas* en utilisant les graines et les boutures, en semis en pots et en semis direct sur sol pauvre de type ferralsol. La durée de reprise et le temps de latence sont plus lents pour les boutures que pour les graines, en semis en pot comme en semis direct. Le taux de germination des graines et de reprise des boutures semées en pot est très élevé, (i.e., 94% et 97%, respectivement), mais il est très faible lorsqu'elles sont semées directement au champ (i.e., 5% et 1.4%, respectivement). Les faibles résultats obtenus en plein champ ont liés à l'excès d'eau et à l'asphyxie des plantules. Dans l'ensemble, la croissance en hauteur, au diamètre au collet et la production foliaire des plantules en semis en pots comme en semis au champ est continue dans le temps. Toutefois, cette croissance est plus lente en semis direct qu'en semis en pot. Aussi, la croissance au diamètre au collet et la production foliaire varie selon le type de matériel

végétal en semis en pots. Cette croissance est meilleure pour les boutures que pour les graines.

Nos résultats montrent que dans des conditions tropicales humides comme celles de notre étude, il est préférable de (1) multiplier le *J. curcas* dans des pots avant une transplantation plutôt que de les semer directement en plein champ et (2) d'utiliser des boutures plutôt que des graines. Si toutefois le semis direct est incontournable, l'utilisation des graines semblerait être une avenue à préconiser. Ces résultats vont permettre de mieux orienter les équipes de recherches et les paysans qui souhaitent implanter des systèmes de *J. curcas* dans la zone tropicale humide. La culture du *J. curcas* peut également non seulement permettre de restaurer les sols tropicaux dégradés et aussi limiter la pression et la déforestation des forêts naturelles.

2.9 Conflit d'intérêts

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont aucun conflit d'intérêts.

2.10 Contributions des auteurs

La rédaction principale a été assurée par RMP, VP, TEE et PNN. L'expérimentation a été menée par RMP.

CHAPITRE 3

L'ÉCARTEMENT DE PLANTATION AFFECTE DIFFÉREMMENT LA CROISSANCE VÉGÉTATIVE DU *JATROPHA CURCAS* L. EN CULTURE SUR UN SOL SUREXPLOITÉ AU NORD DU GABON.

Renaud MASSOUKOU PAMBA^{1,2}, Vincent POIRIER², Pamphile NGUEMA NDOUTOUMOU^{*3,4}

¹Ministère des Eaux et Forêts, de la Mer, de l'Environnement, chargé du Plan d'Affectation des Terres. Libreville (Gabon). ²Laboratoire de l'Unité de Recherche et Développement en Agriculture et Agroalimentaire de l'Abitibi-Témiscamingue. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. Québec (Canada). ³Laboratoire de Biotechnologies Végétales. Département d'Agronomie Générale. Institut de Recherches Agronomiques et Forestières. Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique. Libreville (Gabon). ⁴Laboratoire LaSciViT. Département des Sciences de la Vie et de la Terre. Unité d'Enseignement et de Recherche Sciences et Technologies. Ecole Normale Supérieure (ENS). Libreville (Gabon).

*Auteur correspondant : E-mail: pamphilen@hotmail.com, Tel : +241066035460 / +241077770705

Le manuscrit a été soumis le 27/10/2021, accepté le 21/01/2022 et publié le 28/02/2022 par le journal *International Journal of Biological and Chemical Sciences* (IJBCS).

3.1 Résumé

Jatropha curcas L. est une plante arbustive de la famille des Euphorbiaceae qui a la capacité de croître en s'adaptant à divers environnements. Cette étude visait à apprécier son développement lorsqu'il est conduit sur un sol surexploité. Spécifiquement, il s'agit de tester le type de matériel végétal, l'écartement de semis et le temps sur quelques paramètres morphométriques de cette espèce. Le modèle linéaire à effet mixte et le modèle linéaire généralisé ont été utilisés sous le logiciel R pour évaluer les performances de croissance du pourghère. Les analyses statistiques ont permis de comparer les moyennes. Les résultats révèlent que la croissance en hauteur des plantes de *Jatropha* est influencée de manière très significative ($P < 0.001$) par l'interaction du type de matériel végétal et de l'écartement de semis et que la croissance du diamètre au collet s'accroît avec le temps tout le long de l'année. L'émission des feuilles s'est accrue pendant les trois premiers mois, puis il y a eu une chute continue le reste du temps quel que soit l'écartement et le type de matériel végétal. Au regard des résultats obtenus, il ressort que *Jatropha curcas* développe plusieurs mécanismes pour s'adapter et croître sur un sol surexploité.

Mots clés : *Jatropha curcas* L., graines, boutures, écartements, temps, croissance.

Abstract

Jatropha curcas L. is a shrub in the Euphorbiaceae family that has the ability to grow adapting to various environments. This study aimed at assessing its development when it is carried out on overexploited soil. Specifically, it is a question of testing the type of plant material, the seedling spacing and the delays on some morphometric parameters of this species. The linear mixed-effect model and the generalized linear model were used under the R software to assess the growth performance of the jatropha. Statistical analyzes made it possible to compare the means. The results reveal that the height growth of *Jatropha* plants is influenced very significantly ($P < 0.001$) by the interaction of the type of plant material and the seedling spacing and that the growth of the diameter at the root collar is increased, over time throughout the year. Leaf emission increased for the first three months, then there was continuous drop the rest of the time regardless of spacing and type of plant material. In view of the results obtained, it appears that *Jatropha curcas* develops several mechanisms to adapt and grow on overexploited soil.

Keywords: *Jatropha curcas* L., seeds, cuttings, spreads, time, growth.

3.2 Introduction

La régénération artificielle des plantes est conditionnée par plusieurs facteurs, notamment la qualité du type de matériel végétal utilisé, les techniques de plantation comme les écartements entre les plants et la profondeur de transplantation, ainsi que la conduite des plants en pépinières (Sarir et Benmahioul, 2017). A cela s'ajoute la qualité du sol utilisé, car il a une fonction biologique qui se caractérise d'abord par

l'hébergement d'une large part de la biodiversité terrestre (Calvet, 2003), et ensuite par le rôle nutritif joué par le milieu édaphique. Le sol contient du P, Ca et Mg et la toxicité de l'Al et du Mn qui sont des ressources nécessaires et importantes pour la croissance et le développement des plantes et la productivité forestière (St. Clair et al., 2008). Les sols sont continuellement dégradés par les activités humaines. En Afrique, et particulièrement au Gabon, cette dégradation est croissante et est liée à plusieurs facteurs comme la surexploitation des sols à vocation agricole, la fréquence des pluies, les techniques culturales sur brûlis et les labours, l'utilisation d'engins pour le travail du sol et l'extraction des minerais (PANLCDT, 2007).

Le secteur agricole au Gabon est le sixième pourvoyeur d'emplois. Le pays reste toujours tributaire des importations qui couvrent environ 60 % des besoins alimentaires du pays (MEPNRT, 2007). Pour faire face à la baisse du Produit Intérieur Brut (PIB) relatif au secteur agricole, l'Etat s'est lancé dans l'agriculture intensive comme la culture du cacao et de l'hévéa à travers le pays. La résultante de cette vision est la dégradation des sols surexploités et subséquentement leur abandon par les cultivateurs. Il serait donc judicieux d'élaborer des techniques pouvant restaurer lesdits sols. *Jatropha curcas*, en français le pourghère, est une plante arbustive monoïque et pérenne de la famille des Euphorbiaceae et originaire d'Amérique centrale (Henning, 2002; Sunil et al., 2009). Il s'adapte à de nombreuses conditions écologiques en raison de sa résistance à la sécheresse et de ses racines latérales qui se développent près de la surface du sol (Diakité, 2018; Domergue et al., 2008; Henning, 2002). Il pousse presque partout en Afrique, notamment sur les sols caillouteux, secs, sablonneux, salins et même sur les sols marginaux pauvres en éléments nutritifs (Barro et al., 2013; Domergue et al., 2008). Il peut pousser sur des sols dégradés (Üllenberg, 2007) et peut même pousser presque exclusivement grâce à l'humidité de l'air selon Domergue et Pirot (2008). Il est cultivé dans les régions tropicales et subtropicales en raison de sa capacité d'adaptation même dans les zones semi-arides (Datta et al., 2007). Il s'agit donc d'une

plante plastique vis-à-vis de l'écologie (Nguema Ndoutoumou et al., 2019). *J. curcas* a de faibles besoins nutritionnels, et pousse jusqu'à un pH de 9 dans le sol (Tewari, 2007). Selon Behera et al. (2010) sur des sols très acides, le développement du *J. curcas* pourrait nécessiter une fertilisation en Ca et Mg. Il se multiplie par le semis et le bouturage (Yang et al., 2012). La multiplication végétative (bouturage) est la meilleure alternative pour la production rapide de fruits alors que la propagation générative (semis direct) est intéressante pour une production élevée de biomasse (Nguema Ndoutoumou et al., 2013). Les études sur le *Jatropha curcas* au Gabon sont rares, et il y a très peu des données scientifiques qui traitent de la croissance du pourghère sur un sol surexploité. Il y a aussi une insuffisance de connaissances sur la comparaison de croissance entre les plantes issues de graines et celles issues des boutures dans de telles circonstances. Aussi, l'objectif principal de la présente étude était-il d'évaluer la capacité de ce modèle végétal à croître sur un sol dégradé par la surexploitation culturale intensive de cacaoyers (*Theobroma cacao* L.) et de l'hévéa (*Hevea brasiliensis* L.). Nous cherchons à vérifier l'hypothèse selon laquelle, la multiplication avec les graines permet d'obtenir une meilleure croissance en hauteur et du diamètre au collet, et un meilleur développement foliaire du pourghère que la multiplication par bouturage. Précisément, il s'agit d'abord de tester l'effet du type de matériel végétal et de l'écartement sur les paramètres de croissance et ensuite, suivre l'évolution des plants dans le temps à court terme (14 mois environ). Cette étude souhaite démontrer le fait que *Jatropha curcas* peut croître sur un sol ayant comme précédent cultural, l'exploitation intensive et successive de cacaoyers et d'hévéas.

3.3 Matériel et méthodes

3.3.1 Localisation du site

L'étude a été réalisée au nord du Gabon, dans département du Ntem de la province du Woleu Ntem, précisément au village Akam Effack situé à vingt-cinq (25) kilomètres de la ville de Bitam (Figure 3.1). Le climat est tropical de type humide (cf. climate-data.org). Le cycle climatique comporte quatre saisons réparties en fonction de l'intensité des pluies et de la sécheresse : une petite saison sèche (janvier et février) ; une grande saison des pluies (mars, avril, mai, juin) ; une grande saison sèche (juillet, août et septembre) et une petite saison des pluies (octobre, novembre et décembre). La température moyenne annuelle dans cette province est de 23,3 °C. La pluviométrie moyenne varie entre 1800 et 2300 mm/an. L'humidité relative de l'air avoisine 98 % (Nguema Ndoutoumou et al., 2013).

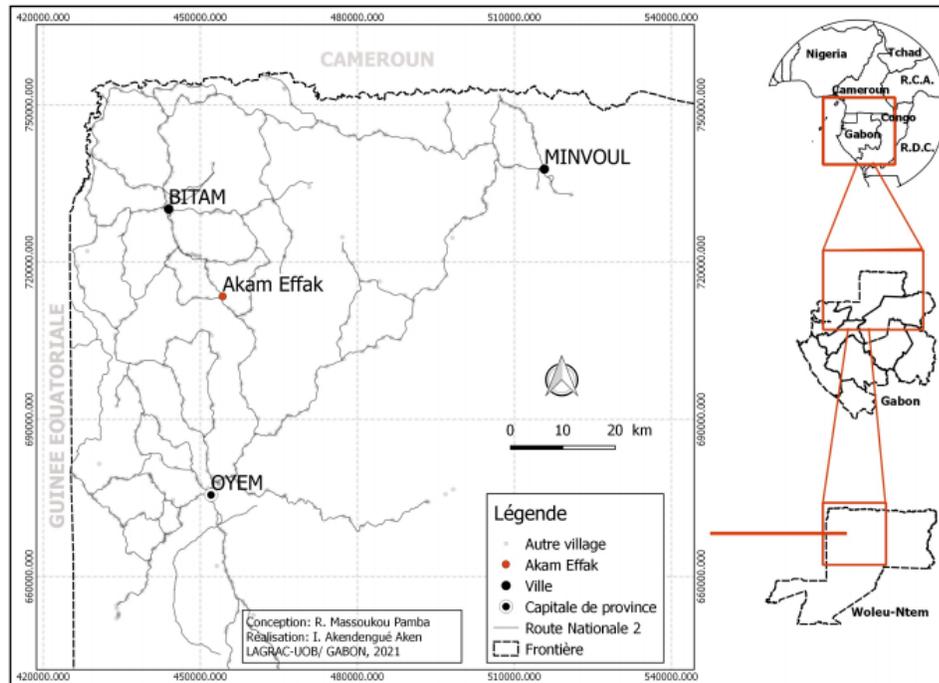


Figure 3.1 Localisation du village Akam Effack dans le département du Ntem, province du Woleu-Ntem au Gabon.

3.3.2 Caractéristiques des sols

Les sols sont ferrallitiques fortement désaturés et sont formés sur des roches métamorphiques acides. La minéralogie est dominée par des argiles de type kaolinite. Les sols sont généralement acides et profonds (2 à 5 m) avec un horizon humifère peu épais (0 à 5 cm) (Martin, 1977; MEPNRT, 2007; Nasr et al., 1995). Les prélèvements de sol ont été effectués sur deux horizons (0-10 cm et 10-20 cm) dans chacune des 24 parcelles pour un total 48 prélèvements de sol pour l'ensemble du dispositif expérimental. Un prélèvement est constitué d'un composite de trois échantillons réalisés sur une même parcelle. Pour la texture du sol, la méthode décrite par Kroetsch

et Wang (2006) a été utilisée. Elle consiste à disperser les agrégats du sol en unités distinctes par un moyen mécanique suivi d'une séparation des particules en classes de la taille des sables (2 mm – 50 µm), des limons (50 µm – 2 µm) et des argiles (<2 µm) par sédimentation. Le pH du sol a été évalué par la méthode de Hendershot et al. (2006). La mesure est faite après la mise en suspension des échantillons de sol séché à l'air dans une solution de CaCl₂ à 0,01 M, selon un ratio sol : solution égal à 1 : 2. La détermination des éléments fertilisants tels que P, K, Ca, Mg, Na, Cu, Zn, Mn et Al a été obtenue en utilisant la solution d'extraction Mehlich 3 d'après la méthode décrite par Ziadi et Sen Tran (2006). Le carbone et l'azote ont été mesurés à l'aide de l'appareil varioMAXcube de la compagnie Elementar. Ils sont analysés par combustion sèche à haute température (1150 °C). Les gaz générés sont ensuite analysés par un détecteur à conductivité thermique.

Tableau 3.1 Paramètres physico-chimiques du site expérimental

Paramètres physico-chimique	Profondeur 1, (0 à 10 cm)	Profondeur 2, (10 à 20 cm)	Moyenne
pH	3,6	3,6	3,6
Carbone-Azote (g/kg)			
Carbone	10,8	10,0	10,4
Azote	0,9	0,9	0,9
Ratio carbone/azote (C/N)	12,0	11,1	11,5
Métaux (mg/kg)			
Al	884,6	908,1	896,3
Ca	19,1	16,0	17,6
Cu	0,4	0,4	0,4
Fe	125,6	116,2	120,9
K	18,5	16,4	17,5
Mg	5,2	4,5	4,8
Mn	1,0	0,9	1,0
Na	3,2	2,7	2,9

Tableau 3.1 Suite

P	3,2	2,7	2,9
Zn	0,4	0,3	0,4
Granulométrie (%)			
Argile	50,5	50,4	50,4
Sable	48,4	45,7	47,0
Limon	2,6	3,8	3,2

3.3.3 Matériel végétal et transplantation

Le matériel végétal utilisé était composé de graines et boutures de *Jatropha curcas* L. importées du Burkina-Faso. Les boutures sont issues de rameaux lignifiés d'ordre 1 (première ramification), c'est à dire le fragment proximal relié à la tige principale. Elles sont coupées sur 30 cm de long, portant 3 nœuds en moyenne. Elles ont été prélevées sur des plants de *J. curcas* de quatre ans et après la deuxième fructification. Les graines proviennent des fruits de la deuxième fructification. Les plantules issues des graines et des boutures ont été conduites en pépinière avant d'être transplantées. La transplantation a été effectuée trois mois après la levée des graines et la reprise des boutures en pépinière. Les sacs en polyéthylène noirs ont été coupés à l'aide d'un sécateur afin de récupérer les plantules pour les planter dans des trous de 30 cm x 20 cm x 20 cm à l'aide d'un plantoir. Pour éviter la concurrence avec les mauvaises herbes, un désherbage manuel à l'aide d'une machette (modèle Tramontina) a été effectué en rond de 40 cm de rayon autour de chaque plante une fois par mois. De plus, une débroussailleuse mécanique de marque Stihl® a été employée régulièrement afin de

contrôler de manière plus générale les mauvaises herbes dans l'ensemble du dispositif expérimental.

3.3.4 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est constitué de quatre blocs de 126 m x 36 m chacun espacés de 10 m les uns des autres. Chacun des quatre blocs renferme six parcelles de 12 m x 12 m recevant l'un des six traitements (graine 2 m x 2 m, bouture 2 m x 2 m, graine 2.5 m x 2.5 m, bouture 2.5 m x 2.5 m, graine 3 m x 3 m et bouture 3 m x 3 m) à l'étude. L'attribution des traitements aux parcelles à l'intérieur de chaque bloc est faite de manière complètement randomisée. Le dispositif expérimental est construit selon un plan d'expérience en blocs complets aléatoires et totalise 24 parcelles. Les variables indépendantes étudiées dans le cadre de cette étude sont : le type de matériel végétal avec deux niveaux (graine et bouture) et l'écartement de plantation avec trois niveaux (2 m x 2 m ; 2,5 m x 2,5 m et 3 m x 3 m correspondant respectivement à 25, 20 et 16 plantes par parcelle de 144 m²). Les trois écartements ciblés sont comparés pour les graines d'une part, et pour les boutures d'autre part. Le dispositif expérimental a été implanté sur un sol surexploité, dont le précédent cultural a été deux systèmes monocultureux industriels et successifs pendant 43 ans au total. Il y a d'abord eu une cacaoyère pendant 23 ans de 1976 à 1999, puis l'hévéaculture pendant 20 ans (de 1999 à 2019). Plusieurs opérations techniques ont été faites sur une superficie entière de 6500 m² (130 m de longueur sur 50 m de largeur), afin de préparer le terrain. Le débroussaillage a consisté à couper avec la machette, le plus bas possible toutes les herbes se trouvant dans la superficie identifiée pour la plantation. L'abattage a consisté à couper, à un mètre de hauteur du sol tous les arbres dont le diamètre était supérieur à

10 cm présents sur cette même superficie, à l'aide de la tronçonneuse et à la machette tous les autres arbres. Le nettoyage manuel a consisté à ramasser toutes les herbes et les troncs d'arbres pour les mettre hors de la plantation afin que toute la superficie soit débarrassée de résidus de coupe. Enfin, le dessouchage a été fait à l'aide de la machette et de la pioche, en retirant toutes les souches des troncs d'arbre de moins de 10 cm de diamètre. Les souches restantes ont été éliminées en recourant à la méthode traditionnelle qui consiste à faire un mélange de 15 litres d'huile de vidange de moteur de voiture et 5 litres de gasoil. Ce mélange a été reparti à l'aide d'un pinceau sur toutes les superficies supérieures des souches, une fois par semaine pendant un mois et au moment où le soleil est au zénith. Des précautions supplémentaires ont été prises pour éviter de polluer le sol d'une part, et pour limiter le recrû des hévéas d'autre part.

3.3.5 Mesure des paramètres morphométriques

La croissance en hauteur entre le sol et le premier bourgeon (exprimée en cm) a été mesurée à l'aide d'un mètre ruban et le diamètre au collet à environ 3 cm du sol (exprimés en cm) a été mesuré à l'aide d'un pied à coulisse (Figure 3.2). Ces deux paramètres ont été mesurés pour chaque écartement après la transplantation des plantules provenant de la pépinière. Sur ces parcelles, cinq plantes ont été sélectionnées arbitrairement et ont fait l'objet de mesures pendant un an, d'abord tous les sept jours (une fois par semaine) pendant cinq mois, puis tous les quatorze jours (deux fois par mois) pendant sept mois. Le nombre de feuilles présentes sur les cinq plants sélectionnés pour le suivi de la croissance foliaire a été déterminé par comptage pendant un an, suivant le même principe.

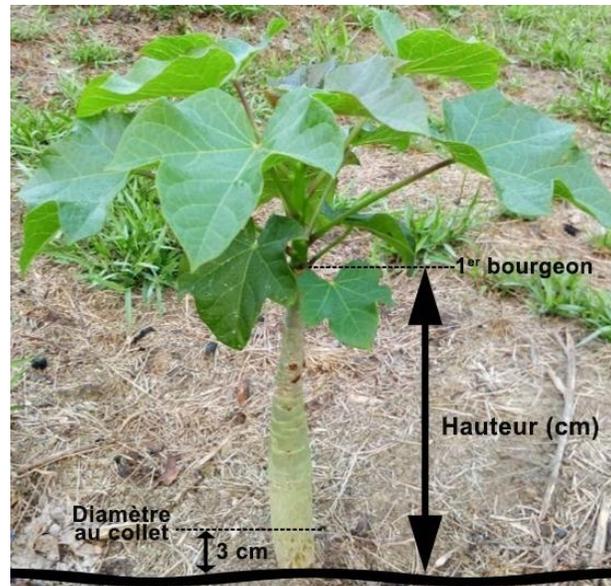


Figure 3.2 Prise des mesures.

3.4 Analyse statistique

Pour évaluer les paramètres de croissance de *Jatropha curcas* (hauteur, diamètre au collet et nombre de feuille), à différentes modalités de plantation, deux modèles d'analyse ont été utilisés sur la base des données collectées et des facteurs impliqués. L'application du test de Shapiro-Wilk a été utilisée pour tester la validité des conditions de l'ANOVA sur les variables hauteur et diamètre au collet, qui montre que ces données suivent une distribution normale. L'écartement de plantation, le type de matériel végétal et le temps ont été considérés comme des facteurs fixes, et le bloc en tant que facteur aléatoire. Le modèle linéaire à effets mixtes sur données longitudinales a été utilisé sur les variables « diamètre au collet » et « hauteur ». Les données sur le nombre de feuilles étant issus d'un comptage, le modèle linéaire généralisé à effet mixte a été appliqué au nombre de feuilles produites par les plantes. L'application de

ces deux modèles a été faite grâce aux fonctions *lmer* et *glmer* (Kuznetsova et al., 2017), respectivement des packages *lmerTest* et *lme4* téléchargés dans le logiciel R. Les résultats des différents tests ont été interprétés au seuil de signification de 5% ($P < 0,05$). A l'issue de chaque test de modèle linéaire à effet mixte, le test de structuration de Turkey a été appliqué sur les facteurs significatifs afin d'évaluer les différences par facteurs. Pour une représentation visuelle des facteurs significatifs, le package *ggplot2* a été utilisé. Le plan étant parfaitement équilibré, les statistiques descriptives (moyennes et écart-type) ont été calculées et ont servi à réaliser les courbes de tendances montrant l'évolution de chacun des paramètres dans le temps. Toutes ces analyses statistiques ont été réalisées dans le logiciel R version 3.5.6 (R Core Team, 2018).

3.5 Résultats

3.5.1 Propriétés physico-chimiques du sol

Les résultats sur les analyses du sol sont contenus dans le Tableau 3.1. Le sol a un pH acide de l'ordre de 3,6. Il a une toxicité élevée avec une forte dominance en aluminium de près de 896,3 mg/kg de sol, suivi du fer avec 120,9 mg/kg de sol. Il en ressort que le sol ayant abrité le site expérimental est pauvre. Cette pauvreté se matérialise par de faibles quantités de nutriments, tels que l'azote (0,9 g/kg), le phosphore (2,9 mg/kg) et le potassium (17,5 mg/kg). Le carbone qui est un des éléments essentiels et constitutifs de la matière organique est également faible dans ce sol (10,4 g C/kg).

3.5.2 Croissance en hauteur et diamètre au collet des plants

Le Tableau 3.2 présente les résultats des modèles linéaires à effets mixtes testant l'effet des écartements, du type de matériel végétal et du temps sur la croissance en hauteur et le diamètre au collet des plantes de *Jatropha curcas*.

Tableau 3.2 Croissance du *Jatropha curcas* en hauteur et au diamètre au collet.

<u>Source de variation</u>	<u>Hauteur (cm)</u>		<u>Diamètre (cm)</u>	
	<u>F value</u>	<u>Pr(>F)</u>	<u>F value</u>	<u>Pr(>F)</u>
TMV	9,177	0,003	0,103	0,749
Ecartement	16,029	<0,001	3,680	0,025
Temps	3017,720	<0,001	31,990	<0,001
TMV:Ecartement	81,579	<0,001	2,309	0,099
TMV:Temps	0,566	0,882	0,432	0,959
Ecartement:Temps	1,086	0,348	1,747	0,011
TMV:Ecartement:Temps	1,023	0,431	0,627	0,929

Légende : **TMV** = Type de matériel végétale, **F value** = valeur de la statistique du test de Fisher.

La croissance en hauteur des plantes de *Jatropha* est influencée de manière très significative ($P < 0.001$) par l'interaction du type de matériel végétal et de l'écartement de semis (Tableau 3.2 et Figure 3.3). Pour les écartements de semis 2 m x 2 m et 2,5 m x 2,5 m, la hauteur moyenne des plantes issues des boutures est significativement différente de celle des plantes provenant du semis direct, même si dans l'écartement 2 m x 2 m la hauteur moyenne des plantes issues des boutures est significativement plus petite que celle des plantes issues des graines et inversement dans l'écartement 2,5

m x 2,5 m. Aussi, pour les écartements 2,5 m x 2,5 m et 3 m x 3 m, les statistiques montrent que les plantes issues du bouturage ont une meilleure croissance moyenne comparativement à celles provenant des graines. Toutefois, pour l'écartement 2 m x 2 m, la croissance moyenne en hauteur des plantes provenant des graines est plus importante que celle provenant des boutures.

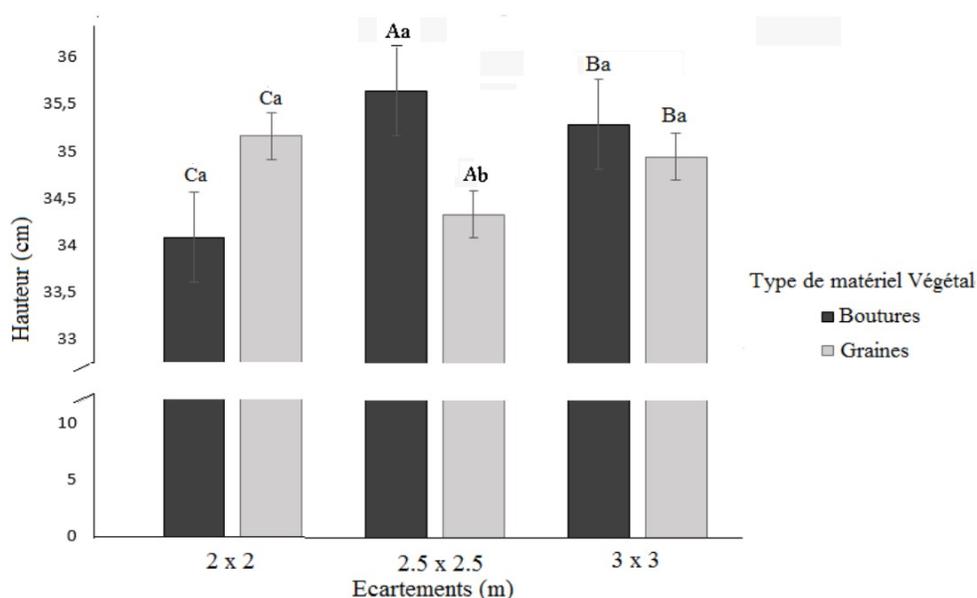


Figure 3.3 Croissance en hauteur du *J. curcas* en fonction du type de matériel végétal et de l'écartement de semis après un an. La 1^{ère} lettre (majuscule) : comparaison entre les écartements pour un même type de matériel végétal, la 2^{ème} lettre (minuscule) : comparaison entre les plantes issues des graines et des boutures dans un même écartement.

Quant à la croissance moyenne en hauteur du *J. curcas* dans le temps (Figure 3.4), on remarque que les plantes ont une croissance moyenne suivant une allure exponentielle dans le temps qui tend vers un plateau à partir du neuvième mois, et ce peu importe l'écartement et le type de matériel végétal utilisé. Cette croissance se traduit en deux

phases, l'une s'étale sur neuf mois, avec une croissance en hauteur marquée, et l'autre porte sur cinq mois avec une croissance relativement lente.

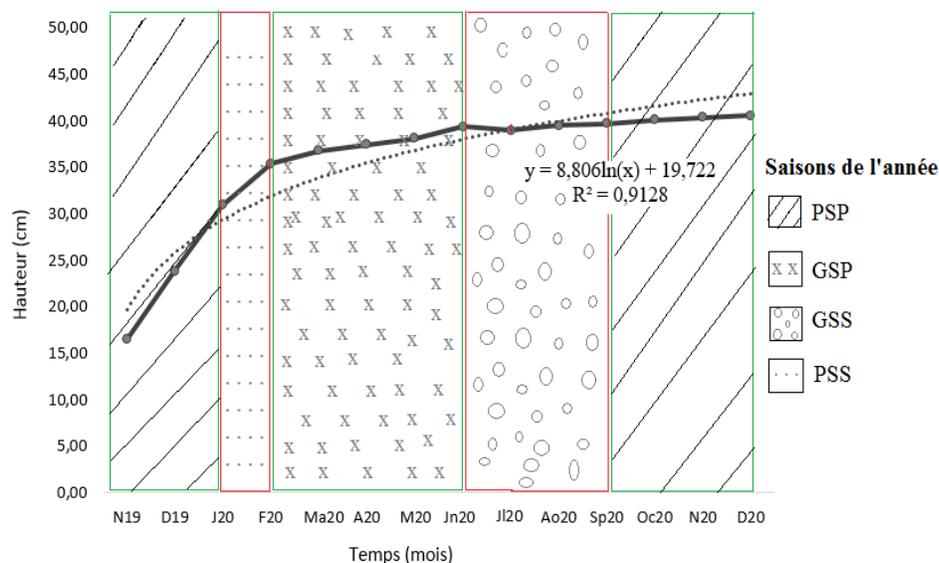


Figure 3.4 Évolution de la hauteur des plants dans le temps. PSP = petite saison des pluies ; GSP = grande saison des pluies ; GSS = grande saison sèche ; PSS = petite saison des pluies.

La croissance au diamètre au collet des plantes de *J. curcas* évolue avec le temps et demeure croissante tout le long de l'année. Cependant, le test de structuration de *turkey* ne montre aucune différence significative dans les écartements pendant les périodes de grande ou de petite saison sèche. En revanche, au cours de la petite saison de pluie ou de la grande saison pluvieuse, des différences significatives sont observées dans la croissance du diamètre au collet. Au cours des deux premiers mois de la grande saison pluvieuse, la croissance du diamètre des plantes issues des graines semées à 2 m x 2 m est meilleure que celle des plantes issues des graines semées à 2,5 m x 2,5 m. Par la suite, le dispositif de densité 2,5 m x 2,5 m, présente une valeur moyenne du diamètre au collet supérieure au dispositif de densité 3 m x 3 m d'écartement (Figure 3.5). Ce

résultat révèle qu'avec un écartement de 2 m x 2 m, le *Jatropha curcas* s'exprime très bien en ce qui concerne la croissance du diamètre au collet des plantes pendant les saisons pluvieuses.

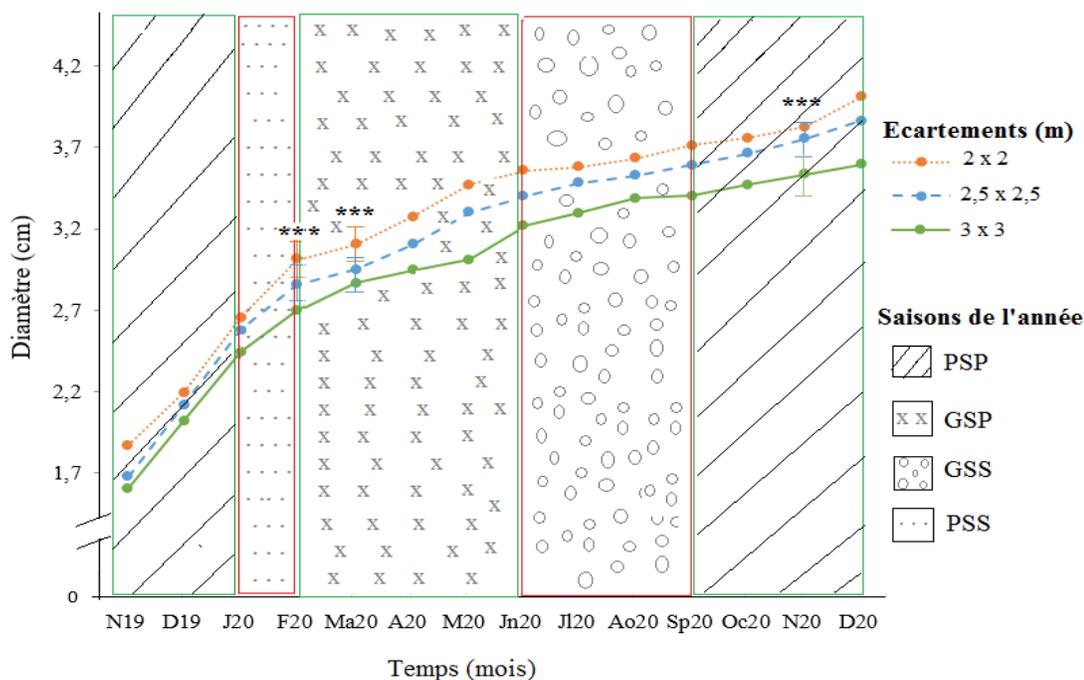


Figure 3.5 Évolution du diamètre au collet suivant les écartements de semis et le temps. PSP = petite saison des pluies ; GSP = grande saison des pluies ; GSS = grande saison sèche ; PSS = petite saison des pluies.

3.5.3 Évolution du nombre de feuilles

La Figure 3.6 illustre la croissance de la production foliaire du *Jatropha curcas* durant les deux premiers mois suivant sa transplantation. Une valeur moyenne maximale de 13 feuilles, peu importe le type de matériel végétal et l'écartement de semis est atteinte

dans les mêmes délais. Cependant, sur le reste de la période d'observation, les plantes ont perdu considérablement leurs feuilles, aussi bien pour les plantes issues des boutures que pour celles issues des graines faisant ainsi passer la moyenne du nombre de feuilles de 13 à 5. Malgré ces deux scénarios, en considérant les différents écartements, on observe que sur la période d'étude, parmi les plantes provenant des boutures, l'écartement de transplantation 2 m x 2 m s'est révélé plus performant que les autres. En ce qui concerne les graines, la performance des plantes en production foliaire est rotative sur trois périodes. La première période s'étale sur 4 mois et elle est marquée par la performance de l'écartement 3 m x 3 m. La seconde période de 5 mois environ, révèle que la densité de semis 2 m x 2 m s'illustre par une meilleure production des feuilles. Enfin, la troisième période est caractérisée par une expression favorable de la densité de semis 2,5 m x 2,5 m par rapport à la croissance foliaire.

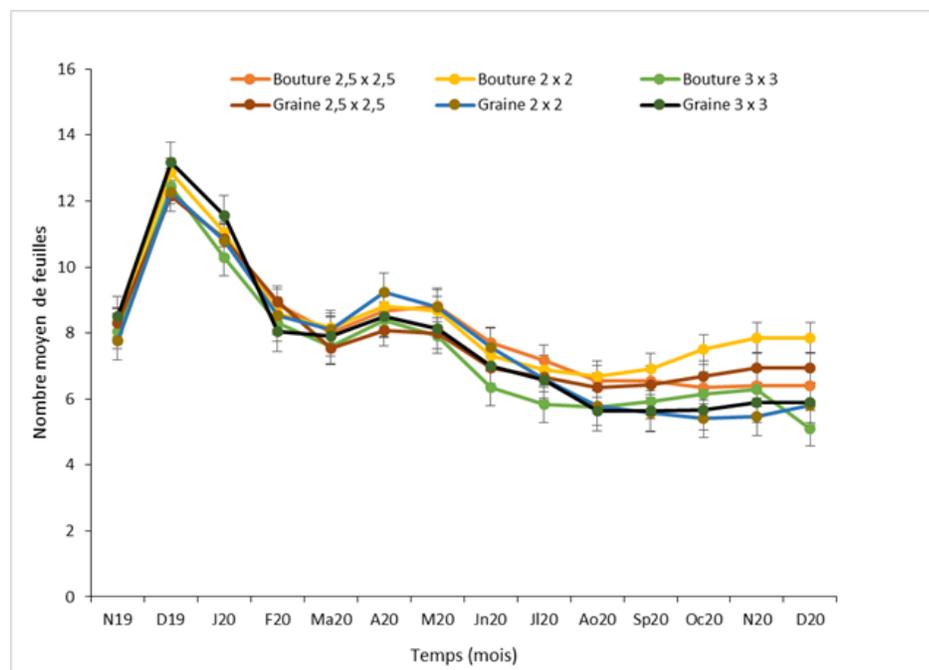


Figure 3.6 Évolution du nombre de feuilles de *Jatropha curcas*, selon le type de matériel végétal et la densité de plantation.

3.7 Discussion

Le niveau identifié pour les particules fines (<50 μm , argile + limon), soit 53,7%, suppose que la concentration en C du sol entier du site expérimental pourrait atteindre environ 23 g/kg selon le modèle développé par Six et al. (2002) pour les sols dominés par les argiles de type 1 :1 en considérant que 85% du C du sol entier est retenu par la fraction fine du sol (Angers et al., 2011). Cependant, la concentration en carbone du sol dans cette étude est en deçà de la moitié de ce qu'elle pourrait être.

Nos résultats montrent que les plantes issues des boutures ont une croissance moyenne en hauteur plus élevée que les plantes provenant des graines pour l'écartement 2,5 m x 2,5 m, contrairement à l'écartement 2 m x 2 m. Ces conclusions rejoignent celles de Domergue et Pirot, (2008) qui affirment que dans un environnement favorable et humide, les plantes de *J. curcas* issues des boutures se développent plus vite que celles issues des graines. Elles sont similaires à celles obtenues par Gautry et al. (2002) sur des essences forestières ligneuses. En effet, le site expérimental est situé dans une zone où l'humidité relative de l'air avoisine 98% (Nguema Ndoutoumou et al., 2013). En outre, Feldmann et al. (2002) arguent que les boutures contiennent des réserves en oligo-éléments, des proportions d'azote, de phosphore et de potassium beaucoup plus élevées que les graines et de ce fait, elles sont moins exigeantes que les graines pour se développer. Aussi, cette variation de la croissance en hauteur en fonction du type de matériel végétal est probablement liée au génotype et semble être influencée par le type de système racinaire développé lors du bouturage. Les racines se développent plus rapidement chez les boutures que chez les graines (Diop et al., 2012). Cependant nos résultats sont contradictoires à ceux réalisés sur le *Jatropha curcas* au Niger par Habou et al. (2014) et Moussa et al. (2017) qui n'ont trouvé aucune différence significative de la croissance en hauteur entre les écartements. Cette différence peut être liée au climat,

qui est plutôt sec au Niger et humide dans notre cas, car la croissance des plantes est également influencée par le patron génétique d'une part (Baudoin et al., 2002), et la compétition intraspécifique d'autre part (Domergue et Pirot, 2008). Selon Minengu et al. (2014), l'écartement de semis influence le développement végétatif des plantes et doit être choisi en fonction des objectifs poursuivis, du système de production et des conditions pédoclimatiques du site d'implantation. Le développement végétatif des plantes varie, en revanche, fortement en fonction des caractéristiques du sol et du climat (Singh et al., 2013). La différence de croissance entre les écartements peut également être liée à l'effet combiné de la compétition entre les plantes et les carences du sol. En effet, notre site expérimental étant implanté dans une zone forestière acide, il existerait des carences en P, Ca et Mg et la toxicité de l'Al et du Mn qui sont des contraintes importantes pour la croissance des plantes (St. Clair et al., 2008). Parallèlement, on remarque que les plantes de *J. curcas* ont une croissance en hauteur continue qui forme un plateau à partir du 9^{ème} mois peu importe l'écartement et le type de matériel végétal. Ce ralentissement de croissance peut se justifier par des carences en éléments nutritifs, certaines caractéristiques physico-chimiques du sol, et aussi des aspects physiologiques intrinsèques à la plante (Nguema Ndoutoumou, 2007). En effet, selon la loi du minimum de Liebig, la croissance des plantes devrait être limitée par la seule ressource dont l'offre est la plus faible par rapport aux besoins (Bergeret et Dufumier, 2002). La croissance observée au début de la transplantation est due à l'utilisation des réserves d'eau accumulées lors de l'arrosage régulier en pépinière.

Pour le diamètre au collet, les résultats montrent qu'en toutes saisons, la croissance est continue, mais elle est plus marquée en saison de pluies. Nguema Ndoutoumou et al. (2013) sont parvenus aux mêmes résultats au sud-est du Gabon, où le climat est de type tropical humide. Ils ont également obtenu une croissance du diamètre moyen au collet continue dans le temps. Cependant, nos résultats sont en contradiction avec ceux

réalisés en Afrique de l'Ouest où le climat est plutôt de type tropical semi-aride par Ouédraogo (2006) au Mali, rejoint par Moussa et al. (2017) au Niger qui ont observé que la croissance moyenne du diamètre au collet des plantes de *J. curcas* n'est pas continue dans le temps, car elle diminue pendant la saison sèche. Cette variation de la croissance moyenne au diamètre au collet des plantes de *J. curcas* est essentiellement due à la différence notable des conditions climatiques entre les zones d'études. Pour faire face au déficit en eau, la plante réagirait en diminuant la croissance moyenne de son diamètre au collet. C'est un caractère adaptatif qui permet au *Jatropha curcas* de résister à la sécheresse (Ouédraogo, 2006), car le diamètre des jeunes troncs de la plante diminue pendant les saisons sèches pour reprendre leurs dimensions normales pendant les saisons pluvieuses (Domergue et Pirot, 2008). Ceci suggère que le *J. curcas* est une plante plastique d'abord parce qu'elle s'adapte aux changements d'humidité et de température de l'air du milieu (Diakité, 2018; Henning, 2002; Nguema Ndoutoumou et al., 2019; Ouédraogo, 2006), mais aussi en raison de sa capacité d'adaptation dans plusieurs régions tropicales, subtropicales et semi-arides (Datta et al., 2007).

Concernant la production foliaire, l'évolution du nombre de feuilles est croissante pendant les trois mois qui ont suivi la transplantation des plantes de *J. curcas*, puis une décroissance progressive de leur nombre s'ensuit durant le reste de la période d'observation, et quel que soit la saison. Cette tendance baissière est également observée pour les plantes issues des graines comme pour celles issues des boutures, même si quelques variations existent. Nos résultats sont contradictoires à ceux de Domergue et Pirot (2008) qui estiment qu'en général, dans les zones humides, les plantes pérennes comme le *Jatropha curcas* gardent leurs feuilles toute l'année. Les travaux réalisés par Nguema Ndoutoumou et al. (2013), dans une zone humide et Moussa et al. (2017) dans une zone semi-aride montrent également une croissance moyenne continue en production foliaire dans le temps pour les plantes issues des

boutures comme pour celles issues des graines. Selon Singh et al. (2013), le développement végétatif des plantes varie fortement en fonction des caractéristiques du sol et du climat. La divergence des résultats est liée aux caractéristiques du sol de notre site expérimental, car les sols argileux ne conviennent pas au *Jatropha curcas* (Gour, 2006), or le nôtre contient 53,03% d'argile. Lorsque le sol présente des carences, les plantes carencées s'adaptent en montrant un ralentissement ou un arrêt de croissance des racines qui affecte ensuite l'ensemble de sa croissance du système végétatif des plantes (Nasser, 2002). La chute continue des feuilles quel que soit la saison, lors de nos observations est certainement liée aux caractéristiques du sol expérimental.

3.8 Conclusion

Le développement végétatif (croissance en hauteur et du diamètre au collet, production foliaire) pour les plantes issues des boutures comme pour celles issues des graines du *J. curcas* est influencé par les conditions climatiques et la qualité du sol. Les plantes issues des boutures ont une meilleure croissance en hauteur que celles issues des graines et que cette croissance est plus performante pour l'écartement 2,5 m x 2,5 m. Les plantes issues des boutures contiennent des réserves nutritives qui leur permettent de se développer plus vite que les plantes issues des graines et la différence de croissance entre les écartements est liées à l'effet combiné de la compétition et des carences du sol du site expérimental. Cependant, quel que soit la saison, la croissance du diamètre au collet est continue avec de légères variations en fonction des écartements. Le *Jatropha curcas* perd progressivement ses feuilles quel que soit la saison et le type de matériel végétale pendant notre période d'observations. La perte des feuilles est le résultat de la pauvreté du sol qui limite la croissance des racines et

du reste de la plante. Le jatropha est donc une plante plastique capable de croître sur un sol dégradé par la monoculture successive et intensive de cacaoyers et d'hévéas.

3.9 Conflit d'intérêts

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont aucun conflit d'intérêts.

3.10 Contributions des auteurs

La rédaction principale a été assurée par RMP, VP et PNN. L'expérimentation a été menée par RMP.

CHAPITRE 4

GROWING *JATROPHA CURCAS* L. IMPROVES THE CHEMICAL CHARACTERISTICS OF DEGRADED TROPICAL SOILS: THE CASE OF CARBON, NITROGEN AND pH.

Renaud MASSOUKOU PAMBA^{1,2}, Pamphile NGUEMA NDOUTOUMOU^{3,4},
Terence Epule EPULE¹, Vincent POIRIER*¹

¹ Agriculture and Agri-Food Research and Development Unit, University of Quebec at Abitibi-Témiscamingue. Notre-Dame-du-Nord (Canada).

² Ministry of Water, Forests, Sea and the Environment in charge of the Land Allocation Plan. Libreville (Gabon).

³ Laboratory of Plant Biotechnologies, Department of General Agronomy, Institute for Agronomic and Forest Research, National Center for Scientific and Technological Research. Libreville (Gabon).

⁴ Laboratory LaSciViT. Department of Life and Earth Sciences, Science and Technology Teaching and Research Unit, Superior Normal School. Libreville (Gabon).

* Corresponding author: vincent.poirier@uqat.ca

Cet article a été soumis le 28 février 2024 dans le journal *Tropical Ecology*

4.1 Abstract

Subject description.

Intensive agriculture in tropical regions is a main cause of soil impoverishment, making it unproductive. Studies based on soil restoration methods are being implemented, including the use of plants such as *Jatropha curcas* L., which could have the capacity to improve the agronomic properties of degraded soils in the tropics.

Objective

The aim of this study is therefore to demonstrate that *J. curcas* L. can improve the characteristics of a degraded tropical soil.

Method

Between October 2019 and November 2022, we evaluated the effect of spacing, types of planting material and age, as well as their interactions, on carbon (C) and nitrogen (N) concentrations and pH at two depths (i.e., 0-10 and 10-20 cm) in the soil.

Results

The results reveal that after three years of *J. curcas* L. growth, C concentration and soil pH increased significantly ($P < 0.001$) at both depths, while N concentration increased significantly between 0-10 cm only. Plants grown from cuttings improved soil pH at 10-20 cm depth more ($P = 0.012$) than those grown from seeds. Three years after

planting, soil N concentration under *J. curcas* reached a value comparable to that of an undisturbed adjacent soil.

Conclusion

Overall, our results indicate that *J. curcas* is a plant that can contribute effectively to restoring degraded tropical soils, therefore contributing to limit deforestation of natural forests.

Key words: *Jatropha curcas* L., seeds, cuttings, time, carbon, nitrogen, pH.

Résumé

Description du sujet.

L'agriculture intensive en région tropicale est la cause de l'appauvrissement des sols qui les rend improductifs. Des études basées sur les méthodes de restauration des sols sont mises en place parmi lesquels l'utilisation des plantes telle que le pourghère (*Jatropha curcas* L.), qui a la capacité d'améliorer les propriétés agronomiques des sols dégradés.

Objectifs

L'objectif de cette étude est donc de démontrer que le *J. curcas* peut améliorer les caractéristiques des sols dégradés.

Méthode

Nous avons évalué, entre octobre 2019 et novembre 2022, l'effet de l'écartement de semis, du type de matériel végétal et de l'âge de la plantation ainsi que leurs interactions sur les concentrations en carbone (C) et en azote (N) et le pH du sol prélevé à deux profondeurs (0-10 et 10-20 cm) dans le sol.

Résultats

Les résultats révèlent qu'après trois ans de croissance du *J. curcas*, la concentration en C ainsi que le pH du sol ont augmenté significativement ($P < 0.001$) aux deux profondeurs, alors que la concentration en N a augmenté significativement entre 0-10 cm uniquement. Les plantes issues des boutures ont amélioré davantage ($P = 0.012$) le pH du sol que celles issues des graines à la profondeur 10-20 cm. Trois ans après la plantation, la concentration en N des sols sous *J. curcas* a atteint une valeur comparable à celle d'un sol témoin non perturbé.

Conclusion

Dans l'ensemble, nos résultats indiquent que le *J. curcas* est une plante qui peut contribuer efficacement à restaurer les sols tropicaux dégradés.

Mot clés : *Jatropha curcas* L., graines, boutures, temps, carbone, azote, pH.

4.2 Introduction

Tropical soil degradation is either linked to anthropogenic activities or to natural causes such as climate change and other related factors (Lal, 2009, 2015). It can be defined as the process that leads to the reduction of the production potential of these soils (Chenu et al., 2014; Lal, 2001) and the destruction of natural resources (Benbrahim et al., 2004; Lahmar et al., 2007). Soil degradation is caused by several factors such as (i) soil erosion by wind and water (Benbrahim et al., 2004; Rajot et al., 2009), (ii) soil pollution (Khalid et al., 2017), (iii) soil compaction (Al-Awadhi et al., 2003; Walter et Lemercier, 2008), (iv) loss of soil biodiversity (Ahononga et al., 2020), (v) impoverishment in soil nitrogen (N), carbon (C) and phosphorus (P) (El Mazi et al., 2021), (vi) loss of soil macro and micronutrients (Maier et Kress, 2000; Thibodeau et al., 2000) and increased metal toxicity due to soil acidification (Calvaruso et al., 2020; Lal, 2015). Numerous studies acknowledged that the problem of soil degradation affects all areas of the globe where humans are present (Eswaran et Reich, 2007; Eswaran et al., 2019). However, the degradation of tropical soil remains poorly studied despite their global ecological importance.

In the humid tropics, and particularly in Gabon, anthropogenic activities such as the intensive cultivation of cocoa (*Theobroma cacao* L.) and rubber (*Hevea brasiliensis* L.) contribute to soil degradation. Acid forest zones are generally deficient in P, calcium (Ca) and magnesium (Mg), and aluminium (Al) and manganese (Mn) toxicity are major constraints to plant growth (St. Clair et al., 2008). This soil degradation pushes farmers to abandon their land in search of new land, putting pressure on the forests by clearing them and practicing slash-and-burn agriculture. It is therefore urgent to examine how to restore these degraded soils, particularly in the tropics where forests play a huge role in regulating the global C cycle (Mitchard, 2018). Some of the methods available include the use of so-called "soil improvers" such as *Jatropha curcas* (Patel

et Saraf, 2013; Théodore et al., 2021). The use of this plant species has shown promising results for restoring degraded soils in dry tropical climates (Bazongo et al., 2021; Bazongo et al., 2015). However, little is known about its ability to restore degraded tropical soils in humid environments.

Jatropha (*Jatropha curcas* L.) is a species native to tropical America and widespread in many tropical and subtropical areas of Africa and Asia (Divakara et al., 2010; Domergue et al., 2008; Sunil et al., 2009). It is a shrub of the Euphorbiaceae family that reaches 8 m in height (Wang et Ding, 2012; Yang et al., 2007) and that can adapt to a wide range of ecological conditions (Domergue et al., 2008). As such, *J. curcas* can grow on nutrient-poor soils (Bazongo et al., 2021; Bazongo et al., 2015; Massoukou Pamba et al., 2022; Minengu et al., 2014). Several studies have shown the positive effects of *J. curcas* on soil chemical properties, such as soil organic C (SOC) (Ogunwole et al., 2008; Srivastava et al., 2012; Wani et al., 2012), soil total N (Ogunwole et al., 2008; Singh, Singh, Rao, et al., 2013) and soil pH (Behera et al., 2010; Singh, Singh et Tuli, 2013). However, studies showing the cumulative positive effects of *J. curcas* on organic carbon (SOC), total nitrogen and soil pH are rare, as are those showing that *J. curcas* has positive effects on the chemical properties of nutrient-poor soil.

The *J. curcas* can be propagated generatively (seeds) or vegetatively (cuttings) (Achten et al., 2010; Achten et al., 2008). Plants growing from cuttings have a shallower lateral root system than those growing from seeds, will generally have a deeper taproot (Diop et al., 2012; Domergue et al., 2008). However, Massoukou Pamba et al. (2022) showed that the height of *J. curcas* grew from seeds was increased at lower plant spacing, while the opposite was observed for *J. curcas* grew from cutting. These results show that the type of material used for propagation and the spacing between them can influence above- and below-ground growth, and thus could affect the properties of the soil that

supports their growth. Still, how propagation material, plant spacing, and their interaction influence the way *J. curcas* affects the properties of degraded soils and the mechanisms leading to their restoration remains unknown, especially in the humid tropics.

The aim of this work is to assess the capacity of *J. curcas* to improve some characteristics of a degraded tropical soil impoverished by the successive intensive cultivation of cocoa and rubber trees in northern Gabon. We aim to verify the three following hypotheses: (H1) after three years of *J. curcas* cultivation, SOC and total soil N concentrations and soil pH will be greater than before planting; (H2) these improvements will be more emphasized at the surface than at depth in the soil, and (H3) at a higher planting density. To test these hypotheses, a three-year field experiment was conducted in which soils were sampled at 0-10 cm and 10-20 cm depth before and after planting *J. curcas* seeds and cuttings at 2 m x 2 m, 2.5 m x 2.5 m and 3 m x 3 m distances. Soils were analysed for SOC and total soil N concentration and soil pH, and an adjacent soil from an undisturbed natural forest was sampled as a reference for comparison.

4.3 Material and method

4.3.1 Description of the study site and experimental set-up

The study was carried out in the village of Akam Effak, located 25 km from the town of Bitam in Northern Gabon (Figure 4.1). According to the Köppen-Geiger climatic classification, the climate at this site is classified as a tropical rainforest (Af) (Geiger,

1954; Rudolf, 1961). It comprises four seasons, depending on the intensity of rainfall and drought: a short dry season (January and February); a long rainy season (March, April, May, June); a long dry season (July, August and September) and a short rainy season (October, November and December). According to Nguema Ndoutoumou et al (2003, 2019), relative humidity is around 92%, mean annual temperature is 23.3°C and average rainfall varies between 1,800 and 2,300 yearly.

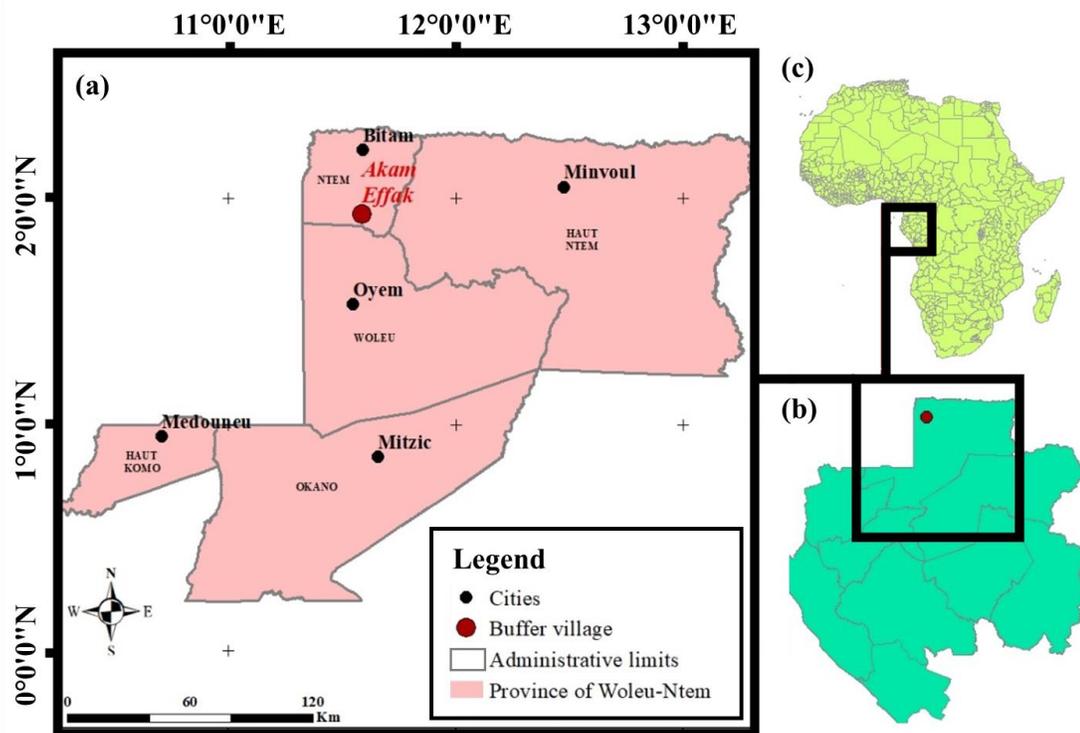


Figure 4.1 Location of Akam Effak village (a) within the province of Woleu-Ntem (b) in Northern Gabon, West Africa (c).

Our experimental set-up was located on an abandoned plantation where intensive cocoa (*Theobroma cacao* L.) (1976 – 1999) and rubber (*Hevea brasiliensis* L.) (1999 – 2019) cultivation succeeded one another for over 43 years. Site preparation operations prior

to the start of the experiment involved manually removing herbaceous vegetation, trees and stumps, and exporting plant residues outside the area where the treatments were installed (see Massoukou Pamba et al. 2022 for details). The experimental set-up comprises three planting distances (i.e. 2 m x 2 m, 2.5 m x 2.5 m and 3 m x 3 m) and two types of material used for propagation (i.e., seeds and cuttings) of *J. curcas*. It includes four replicates, giving a total of 24 treatments, each one attributed to an experimental unit. The latter consisted of a 12 m x 12 m plot receiving between 16 and 25 plants depending on planting distance.

4.3.2 Soil sampling and analysis

Each experimental unit was sampled manually at two soil depths (0-10 and 10-20 cm) using a cylindrical tube measuring 5 cm length x 5 cm stain x 10 cm depth. This yielded 48 soil samples, each one consisting of a composite of three sub-samples taken at the experimental unit level. The soils were sampled in October 2019 after site preparation operations, but before *J. curcas* plantation. In each of the 12 m x 12 m plots, soil sampling was carried out in the same location as in 2019. The soil was sampled again in November 2022 after 40 months of growth at about 15 cm from plant collar. We also sampled soils with the same method in an undisturbed, natural forest located close (i.e., c. 500 m) to our experimental set-up to have a reference site where neither rubber nor cocoa has been grown before. At this reference site, seven sampling points spaced about 5 m apart were arbitrary chosen where soil was sampled at two depths (i.e., 0-10 and 10-20 cm), for a total of 14 soil samples. Each sample consisted of a composite of three sub-samples taken at the sampling point level. Following sampling, soils were

put in plastic bags, weighed, and air-dried for 7 d and sieved to 2 mm prior to analysis. The presence of coarse fragments >2 mm was negligible.

Six (6) grams of air-dried soil from each sample were crushed and approximately 600 mg were taken for the analysis of total soil C and N concentrations by dry combustion using a vario MAX cube apparatus (Elementar Analysensysteme, Langenselbold, DE). There was no inorganic C in the soil and thus total soil C was considered as soil organic C. The pH was obtained by suspending the air-dried soil samples in a 0.01 M CaCl₂ solution at a soil-to-solution ratio of 1:2, as described by Hendershot et al. (2006). Soil texture was measured using the hydrometer method described by Kroetsch et al. (2006). Soil nutrients (P, K, Ca, Mg, Na, Cu, Zn, Mn, Fe et Al) were extracted using the Mehlich III solution and measured by inductively coupled plasma optical emission spectroscopy (ICP-OES) apparatus (model 5110, Agilent Technologies, Santa Clara, US). Soil texture and nutrient concentrations were analysed on samples taken in October 2019 for characterization purposes, while soil C and N concentrations and soil pH were analyzed on samples taken in October 2019 and Novembre 2022 to evaluate the impact of *J. curcas* growth.

4.3 Statistical analysis

The influence of planting distances (i.e. 2 m x 2 m, 2.5 m x 2.5 m and 3 m x 3 m), propagation material (i.e., seeds and cuttings), time period (i.e., October 2019 and November 2022) and their interactions on soil organic C and total soil N concentrations and soil pH. Two soil depths (i.e., 0-10 cm and 10-20 cm) were investigated and analyzed independently from each other. The postulates of homogeneity of variance and normal distribution of residuals were evaluated with Shapiro-Wilk and Levene

tests. Since the results from these tests showed that the postulates were not respected, we used a permutational analysis of variance (PERMANOVA) to evaluate if the treatments or their interactions influenced the dependent variables. This non-parametric analysis allowed us to analyse non-transformed data. The PERMANOVA and averaging were performed with the *perm.anova* package of the R software. We considered effects being significant at $P < 0.10$. To illustrate significance, graphs were produced using the *ggplot2* package of the R software. All analyses were performed with the R 4.0.3 software (R core Team 2020).

4.4 Results

Soil particle size distribution was 504, 470 and 26 g kg⁻¹ of clay (i.e., <2 µm), silt (i.e., 2-50 µm) and sand (i.e., 50 µm – 2 mm) particles and was similar at both soil depths (i.e., 0-10 and 10-20 cm) (data not shown). Analysis of soil nutrients of samples taken in October 2019 revealed high concentrations of Al and Fe (i.e., 896 and 121 mg kg⁻¹ soil, respectively) and low concentrations of P, K, Ca, Mg, Na, Cu, Zn and Mn (i.e., 3, 17, 18, 5, 3, <1 and <1 mg kg⁻¹ soil, respectively). As for soil texture, nutrient concentrations were similar at both soil depths. The effect of planting distance, propagation material, period of time and their interactions on total soil N and soil organic C concentrations and soil pH at both depths are shown in Table 4.1.

Tableau 4.1 Effects of different sources of variation on soil organic carbon (C) and total soil nitrogen (N) concentrations and soil pH at 0-10 cm and 10-20 cm depth.

Source of variation	C		N		pH	
	F value	Pr (>F)	F value	Pr (>F)	F value	Pr (>F)
0-10 cm depth						
D	0.33	0.720	0.80	0.457	1.458	0.246
M	2.11	0.155	1.14	0.292	0.003	0.955
P	21.37	<0.001	3.08	0.087	19.426	<0.001
D x M	0.30	0.741	0.97	0.389	0.106	0.900
D x P	0.36	0.698	0.64	0.535	1.614	0.213
M x P	0.09	0.765	0.74	0.394	0.177	0.676
D x M x P	0.05	0.955	0.86	0.433	0.147	0.864
10-20 cm depth						
D	0.517	0.601	0.890	0.419	0.934	0.402
M	1.720	0.198	0.930	0.341	6.928	0.012
P	47.446	<0.001	2.628	0.114	54.206	<0.001
D x M	0.032	0.969	1.074	0.352	2.263	0.119
D x P	0.122	0.885	0.921	0.407	1.754	0.188
M x P	0.096	0.759	0.772	0.386	0.688	0.412
D x M x P	0.032	0.969	1.012	0.373	0.854	0.434

D = planting distance; M = propagation material; P = period of time.

Our results indicate that the growth of *J. curcas* significantly increased soil organic C concentration. In Novembre 2022, after 40 months of growth, soil organic C concentration was 15.6 and 14.0 g C kg⁻¹ soil at 0-10 and 10-20 cm depths, respectively (Fig. 4.2a and 4.2b). These values are greater than those of the soil sampled in October 2019 (i.e., 10.8 and 10.0 g C kg⁻¹ soil at 0-10 and 10-20 cm depths, respectively) when

there was no *J. curcas* crop yet ($P < 0.001$, Table 1, Fig 4.2a and 4.2b). Growing *J. curcas* thus led an increase of 1.60 and 1.33 g C kg⁻¹ soil yr⁻¹ at 0-10 and 10-20 cm depth, respectively. Still, the values obtained under *J. curcas* cultivation in November 2022 remain below those of the undisturbed natural forest soil used as a reference (Fig. 4.2a and 4.2b).

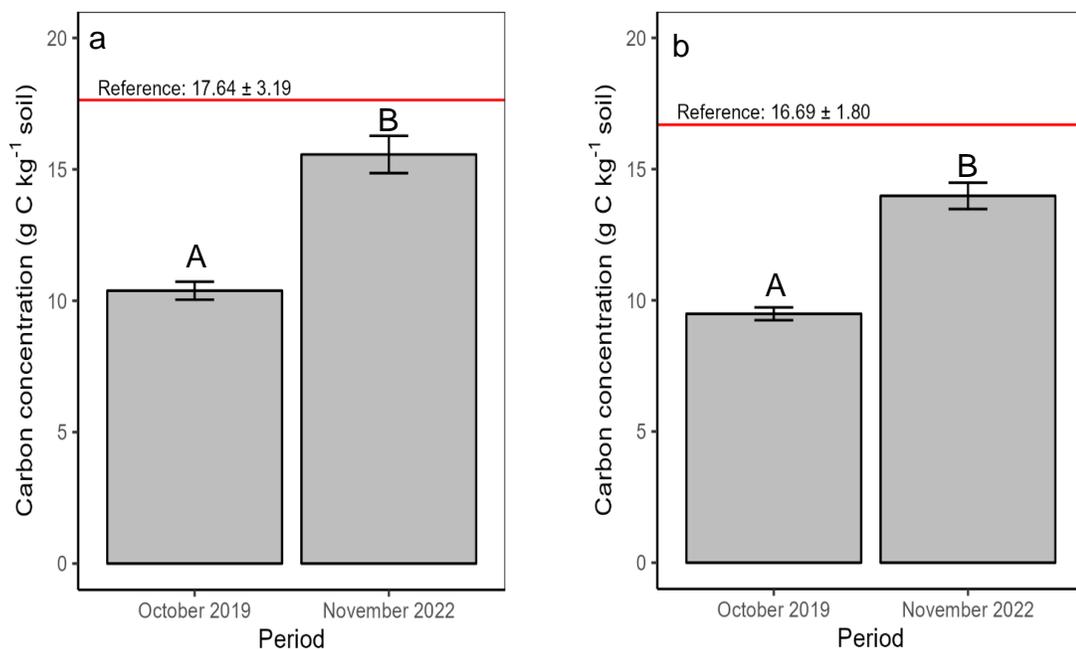


Figure 4.2 Comparison of soil organic carbon concentrations between October 2019 and November 2022 after 40 months of growth of *J. curcas* at 0-10 cm (a) and 10-20 cm (b) depths on a tropical soil that has been previously cultivated intensively during 43 years for rubber and cacao production. Means associated with different letter differ significantly from each other at $P < 0.10$. Vertical bars represent mean standard error. The horizontal red line presents the values of undisturbed natural forest soil used as a reference.

Results for total soil N concentration were similar to those obtained for soil organic C, except that the effect of the period (i.e., October 2019 vs November 2022) was only significant at the 0-10 cm depth ($P = 0.087$, Table 1). In November 2022, total soil N concentration at 0-10 cm depth was about 1.6 g N kg^{-1} soil, which is 1.8 times greater than that measured in October 2019 (i.e., 0.9 g N kg^{-1} soil, Fig. 4.3). After 40 months of growth of *J. curcas*, total soil N concentration in November 2022 in the 0-10 cm depth soil layer reached a value comparable to that of undisturbed natural forest soil used as a reference (Fig. 4.3).

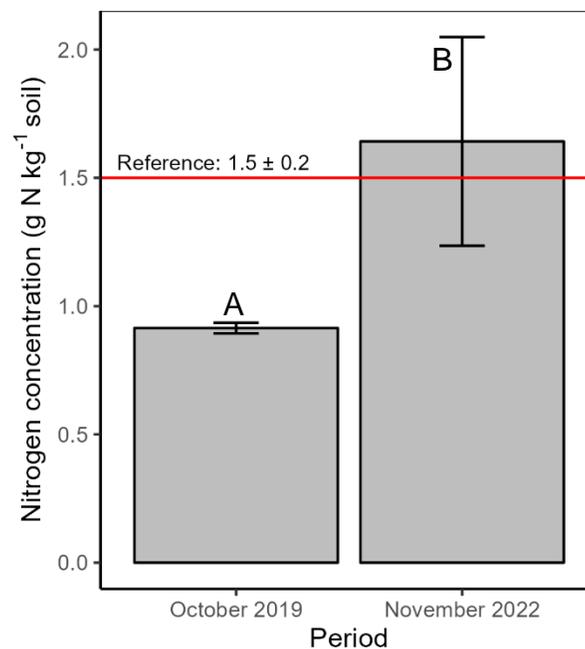


Figure 4.3 Comparison of total soil nitrogen concentrations between October 2019 and November 2022 after 40 months of growth of *J. curcas* at 0-10 cm on a tropical soil that has been previously cultivated intensively during 43 years for rubber and cacao production. Means associated with different letter differ significantly from each other at $P < 0.10$. Vertical bars represent mean standard error. The horizontal red line presents the value of undisturbed natural forest soil used as a reference.

As noted for soil organic C and total soil N concentration, we also found that the growth of *J. curcas* increased soil pH over time. At 0-10 cm depth, soil pH significantly increased from a value of 3.61 before the establishment of our plots in October 2019 to a value of 4.15 in November 2022 ($P < 0.001$, Table 4.1, Fig. 4.4a). At 10-20 cm depth, increase in soil pH was also significant and rose from a value of 3.61 before the establishment of our plots in October 2019 to a value of 4.05 in November 2022 ($P < 0.001$, Table 4.1, Fig. 4.4b). However, soil pH values at both depths under *J. curcas* in November 2022 remained below those of undisturbed natural forest soil (Fig. 4.4a and 4.4b).

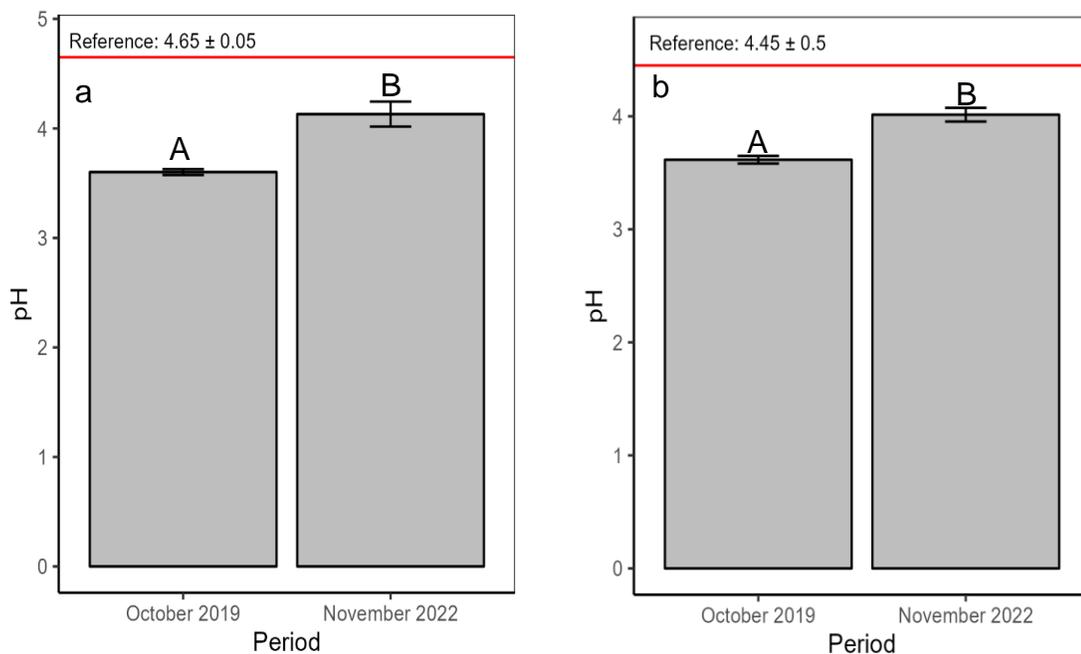


Figure 4.4 Comparison of soil pH between October 2019 and November 2022 after 40 months of growth of *J. curcas* at 0-10 cm (a) and 10-20 cm (b) depths on a tropical soil that has been previously cultivated intensively during 43 years for rubber and cacao production. Means associated with different letter differ significantly from each other at $P < 0.10$. Vertical bars represent mean standard error. The horizontal red line presents the values of undisturbed natural forest soil used as a reference.

We also noted a significant effect of propagation material type on soil pH at 10-20 cm depth. At this depth, plots sown with *J. curcas* cuttings had higher soil pH than those sown with seeds but remained lower than that of the undisturbed natural forest soil (Fig. 4.5).

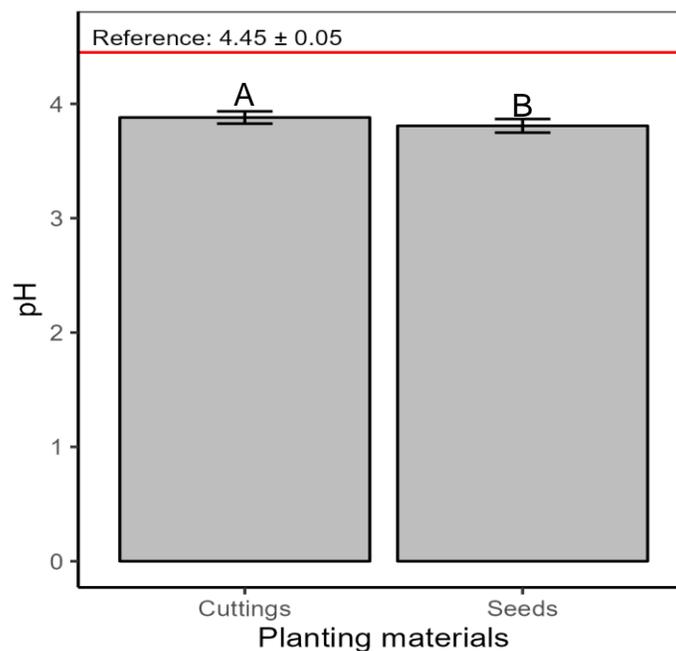


Figure 4.5 Comparison of soil pH at 10-20 cm depth between the two types of propagation material used to grow *J. curcas* on a tropical soil that has been previously cultivated intensively during 43 years for rubber and cacao production. Means associated with different letter differ significantly from each other at $P < 0.10$. Vertical bars represent mean standard error. The horizontal red line presents the values of undisturbed natural forest soil used as a reference.

4.5 Discussion

4.5.1 Soil organic carbon concentration

The results obtained for soil organic C are consistent with our first hypothesis (H1) that its concentration would be higher after three years of *J. curcas* growth than before planting. They are also consistent with our second hypothesis (H2), according to which we expected this effect to be more pronounced at 0-10 cm than 10-20 cm depth. However, results for soil organic C concentration did not support the third hypothesis (H3) as we found no effect of planting distance.

Our results show that soil organic C increased at rates equivalent to 1.60 and 1.33 g C kg⁻¹ soil yr⁻¹ at 0-10 and 10-20 cm depth, respectively, and an average of 1.47 g C kg⁻¹ yr⁻¹ across both depths. This is greater than the rate calculated from results presented by Wani et al. (2012) in tropical India. These authors observed an increase in soil organic C of 3.10 g C kg⁻¹ soil under *J. curcas* after four years, corresponding to a gain of 19 % compared with an adjacent grasslands soil and an accumulation rate equivalent to 0.78 g C kg⁻¹ yr⁻¹. Our results are however comparable to those of Ogunwole et al. (2008) who investigated *J. curcas* growth in degraded soils in India. The latter reported an increase in soil organic C of 4.49 g C kg⁻¹ soil at 0-10 cm depth after 31 months when compared to adjacent soil under native vegetation, corresponding to a rate of 1.74 g C kg⁻¹ yr⁻¹.

Increases in soil organic C could be associated with important litter addition and root biological activities (Block et al., 2006; Chomel et al., 2014; Marone et al., 2017; Sartori et al., 2007). The increase in soil C over time can be explained by the addition of litter from leaf and stem fall, which can be rich organic carbon (Atchada et al., 2018;

Lawrey, 1977; Leye et al., 2009; Singh, Singh et Tuli, 2013). Massoukou Pamba et al. (2022) observed after one year of *J. curcas* growth a progressive drop in leaf production, which could be explained by the low fertility of the soil on which it was planted. This species is a xerophytic plant with deciduous leaves that fall when faced with certain nutrient deficiencies (Anguessin et al., 2021; Massoukou Pamba et al., 2022; Minengu et al., 2014). Leaves that accumulate on the soil add organic matter, which stimulates the growth and activity of soil microbial biomass (Domergue et al., 2008; Haynes et Beare, 1997; Stäuble, 1986). An increase in soil microbial biomass resulting from the abundant fall of *J. curcas* leaves and stems can thus contribute to increase soil organic C concentration (Gbemavo et al., 2014; Wani et al., 2012).

The increase in soil C concentration observed in our study can also be explained by the fact that we sampled the soil close to the stem, in the rhizosphere where soil biological activity is intense (Bazongo et al., 2015; Leye et al., 2009; Paterson, 2003; Wani et al., 2012). The rhizosphere is enriched in C (Chaudhary et al., 2012; Koranda et al., 2011; Paterson, 2003) and this enrichment may result from (i) the intense microbial activity that takes place there (Bazongo et al., 2021; 2015; Leye et al., 2009), (ii) root exudation (Srivastava et al., 2012) and (iii) superficial root development (Achten et al., 2008; Singh et al., 2013). Our results corroborate those of Bazongo et al. (2015) in Burkina Faso who observed, over a relatively short period of time (i.e., 10 months), a greater increase in soil C concentration under *J. curcas* plant crowns and than further away from the plant (Bazongo et al., 2015). The fact that we sampled at 15 cm from *J. curcas* collar likely shows that the root system of this plant has the capacity to increase soil organic C concentration in the short term.

The increase in average soil C levels can also be linked to the development of soil structure and aggregation mechanisms that protect C from decomposition. Indeed, Ogunwole et al. (2008) report that the cultivation of *J. curcas* increased soil aggregate

mean weight and microaggregate- associated organic C concentration compared to an adjacent soil under native vegetation. These results concur with those of Singh et al. (2013) who found a reduction of soil bulk density and an increase of water holding capacity by 10% after three years of *J. curcas* growth. The authors attributed this effect to the positive impact of the *J. curcas* roots on soil structure and macroporosity (Singh et al., 2013). Thus, is it probable that the positive impact of *J. curcas* on soil organic C concentration noted in our work could be caused by the influence of its roots. However, this would need to be demonstrated experimentally.

4.5.2 Total soil nitrogen concentration

The results that we obtained regarding total soil N concentration partly confirm our first hypothesis (H1), since after three years of *J. curcas* cultivation, the average N concentration increased significantly only at 0-10 cm soil depth. This, however, confirms our second hypothesis (H2), according to which this effect should be more pronounced at this depth than at 10-20 cm depth. However, as for soil organic C concentration, results for total soil N concentration did not support the third hypothesis (H3) since no effect of planting distance were found.

Our results concord with Ogunwole et al. (2008) who reported increase in soil N concentration after two years of *J. curcas* cultivation in degraded soils in India, particularly in the microaggregate fraction. The increase we noted (i.e., 1.8 times) was however greater than that of Ogunwole et al. (2008) (i.e., 1.3 times for whole soil N concentration). The enrichment in soil N that we noted could be associated with leaves of *J. curcas* that fell from the plant and accumulated on the soil surface, as mentioned earlier. Leaves from this species are particularly enriched in N as compared with other

parts of the plant (Gbemavo et al., 2014), which facilitates their decomposition by soil microorganisms and the consequent accumulation of N in the upper part of the soil profile.

Another possible explanation for the increase in soil N concentration could be related to the association between *J. curcas* roots and soil microorganisms. This species can form symbiotic association with arbuscular mycorrhizal fungi (Singh, 2006). In addition, although *J. curcas* is not a legume nor an actinorhizal plant, its roots can be colonized by N-fixing endophyte bacteria of the *Enterobacter* species that are native to this plant (Madhaiyan et al., 2013). The presence of arbuscular mycorrhizal fungi and/or endophytic bacteria can increase plant N availability (Afzal et al., 2019; Leye et al., 2009), which can translate into N enrichment of plant leaves (Leye et al., 2009; Madhaiyan et al., 2013). The increased microbial activity under *J. curcas* (Wani et al., 2012) could have promoted the decomposition of N-rich leaves fallen to the ground and consequently enrich the soil with this element.

We sampled the soil close to the stem in the rhizosphere where biological activity is intense, and this could explain why we solely found an increase in soil N concentration at 0-10 cm depth. The presence of arbuscular mycorrhizal fungi and/or endophytic bacteria can also increase soil nitrogen concentration in the rhizosphere (Gupta et al., 2013; Patel et Saraf, 2014). In addition, Wani et al. (2012) showed that the growth of *J. curcas* increased microbial biomass N concentration by 24% in the rhizospheric soil under this species compared to control site. These observation concord with Gbemavo et al. (2014) who concluded that *J. curcas* increased soil biological activity and led to more N accumulated relative to C (i.e., lower C-to-N ratio). Altogether, these results suggest that *J. curcas* has the capacity to improve soil fertility in the upper part of the soil profile.

4.5.3 Soil acidity

The growth of *J. curcas* significantly reduced soil acidity and increased soil pH at both 0-10 cm and 10-20 cm depth, which confirms our first hypothesis (H1). Our second hypothesis (H2) is not verified since the effect observed was not more pronounced at 0-10 cm than 10-20 cm depth. Our results did not either support the third hypothesis (H3) since no effect of planting distance were found. Surprisingly, however, we noted a significant effect of propagation material.

Our results concur with others who showed increases of 0.2 to 0.4 pH units (i.e., the soil being 1.6 to 2.5 times less acidic) after growing *J. curcas* alone in tropical acid soils without amendments (Gbemavo et al., 2014; Kumar et Ghoshal, 2017; Santos et al., 2016; Silva et al., 2016). These studies, however, did not propose any mechanisms to explain how *J. curcas* could increase soil pH and reduce its acidity. Perhaps leaf fall is related to this process, since the addition of plant material to the soil has the capacity to increase soil pH (Butterly et al., 2021; Ritchie et Dolling, 1985). Possible mechanisms include the addition of litter-derived base cations, the association of organic anions from plant material with H^+ or Al^{3+} in the soil and ammonification of organic N (Butterly et al., 2021 ; 2013 ; Ritchie et al., 1985; Serpantié et Ouattara, 2001). More work is needed to clearly identify which mechanism could be responsible for the observed increase in soil pH after three years of *J. curcas* growth in our study.

We also found that soil pH under *J. curcas* at 10-20 cm depth was greater when the species was propagated with cuttings than with seeds. This could be associated with root development of the plant. The latter is superficial with multiple ramifications and has no taproot with cuttings compared with seeds (Achten et al., 2010; Medza Mve et

al., 2011; Singh et al., 2013). Root systems with multiple branches absorb nutrients more easily and promote microbial and enzymatic activities (Bazongo et al., 2021; 2015). Perhaps this translated into increased transformation of organic N in the rhizosphere through ammonification, a process that consumes H^+ and reduces soil acidity (Butterly et al., 2013; 2021). The superficial and ramified root systems with cutting could have released more compounds through rhizodeposition that can complex Al in soils (Bojórquez-Quintal et al., 2017; Jones et al., 2009) thereby reducing the negative impact that Al species have on soil acidification (Bojórquez-Quintal et al., 2017; Boyer, 1976). Here again, more work is needed to clearly elucidate the mechanisms by which planting *J. curcas* with cuttings contribute to increase soil pH compared to with seeds.

4.6 Conclusion

The aim of this study was to demonstrate that the cultivation of *J. curcas* can improve the chemical properties of a soil impoverished by the successive intensive cultivation of cocoa and rubber trees in northern Gabon. The results show that soil carbon concentration increases significantly with time at both sampling depths (0-10 and 10-20 cm). This increase in carbon concentration remains below the value obtained on the soil at the reference site. Nitrogen concentration, on the other hand, increases significantly with time only at the soil surface in the 0-10 cm depth, and the value obtained is above that of the soil at the reference site. Finally, soil pH increased significantly with time at both sampling depths (0-10 and 10-20 cm). This increase in pH remains below the value obtained on the soil at the reference site and translates into

a decrease in soil acidity. Therefore, *J. curcas* plants sown with cuttings improve soil acidity better than those sown with seeds.

The *J. curcas* is a plant that responds effectively to current agricultural needs, both economically and environmentally, as it is a palliative to the use of chemical fertilizers thanks to its soil-enriching action. Growing *J. curcas* on degraded tropical soil thus seems a promising avenue to improve their fertility. This could reduce the pressure exerted on the natural forest by deforestation activities by farmers in search of new, more fertile soils to cultivate. However, further research is needed to ascertain whether growing this plant also improves soil properties over medium- to long-term on the same soil.

4.7: Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

4.8: Authors' contributions

RMP, VP and PNN were the main authors. Experimentation was conducted by RMP.

CHAPITRE 5

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

5.1 Bilan du travail

Cette étude a eu pour objectif de départ d'étudier la capacité du *Jatropha curcas* L. à croître sur un sol dégradé et à en restaurer certaines de ces propriétés chimiques. Elle s'est réalisée au nord Gabon, précisément dans le village Akam Effack, à 25 km de la ville de Bitam. Dans cette zone, on compte plus de 43 ans de culture successive de cacaoyers et d'hévéas. Il y a donc eu une surexploitation qui a engendré un appauvrissement des sols, contraignant ainsi les agriculteurs locaux à abandonner ces sols pour aller à la recherche des nouvelles terres cultivables. Plusieurs activités ont précédé la culture du *Jatropha curcas*. Les hévéas présents sur le champ expérimental ont été abattus, découpés et transportés hors de la plantation. Ensuite, il y a eu un grand nettoyage et désherbage de tout le champ avant la délimitation en quatre blocs et en parcelles expérimentales. Les sols ont été prélevés, analysés au laboratoire et ont révélé qu'ils étaient très acides et pauvres en éléments nutritifs.

Au chapitre II, la première étape a consisté à réaliser deux expériences distinctes pour faire germer les graines et les boutures du *Jatropha curcas* en semis en pot, à la pépinière et en semis en plein champ. Le matériel végétal utilisé était composé des

graines et des boutures du *J. curcas*, importées du Burkina Faso. Les semailles ont eu lieu en saison pluvieuse pour les deux expériences, juste après les premières pluies du mois d'octobre. La pépinière a été installée sous un grand manguier au feuillage très dense. Au champ, le dispositif expérimental a été construit selon un plan d'expérience en blocs complets aléatoires, et totalise 24 parcelles. Les conclusions de cette première expérimentation montrent que la durée de reprise et le temps de latence sont plus lents pour les boutures que pour les graines, en semis en pot comme en semis direct. Le taux de germination des graines et de reprise des boutures semées en pot est très élevé, (i.e., 94% et 97%, respectivement), mais il est très faible lorsqu'elles sont semées directement au champ (i.e., 5% et 1.4%, respectivement). Dans l'ensemble, la croissance en hauteur, au diamètre au collet et la production foliaire des plantules en semis en pots comme en semis direct est continue dans le temps.

La deuxième étape a consisté à évaluer la capacité du *Jatropha curcas* à croître sur un sol dégradé. Le dispositif expérimental mis en place dans cette expérimentation est constitué de quatre blocs de 126 m x 36 m chacun espacés de 10 m les uns des autres. Chacun des quatre blocs renferme six parcelles de 12 m x 12 m recevant l'un des six traitements à l'étude. Les variables indépendantes étudiées dans le cadre de cette étude sont : le type de matériel végétal avec deux niveaux (graine et bouture) et l'écartement de plantation avec trois niveaux 2 m x 2 m ; 2,5 m x 2,5 m et 3 m x 3 m. Les trois écartements ciblés sont comparés pour les graines d'une part, et pour les boutures d'autre part. Cette étude a conduit à conclure que les conditions climatiques et la qualité du sol influencent la croissance en hauteur, le diamètre au collet et la production foliaire des plantes issues des boutures comme pour celles issues des graines du *J. curcas*. En effet, les plantes issues des boutures ont une meilleure croissance en hauteur que celles issues des graines car elles contiennent des réserves nutritives qui leur permettent de se développer plus vite par rapport aux plantes issues des graines. La différence de croissance entre les écartements est liée à l'effet combiné de la compétition et des

carences du sol du site expérimental. La croissance du diamètre au collet est continue avec de légères variations en fonction des écartements. Le *Jatropha curcas* perd progressivement ses feuilles quels que soit la saison et le type de matériel végétal pendant notre période d'observation. La perte des feuilles pourrait être le résultat combiné de la pauvreté du sol et du déficit hydrique qui limite la croissance des racines et du reste de la plante. Le jatropha est donc une plante plastique capable de croître sur un sol dégradé par la monoculture successive et intensive de cacaoyers et d'hévéas.

Le troisième article a consisté à évaluer la capacité du *Jatropha curcas* à améliorer certaines caractéristiques chimiques (pH, carbone et azote) des sols tropicaux dégradés en milieu humide. Le dispositif expérimental comporte deux types de traitements (les graines et les boutures) de *J. curcas* qui sont semées en suivant trois écartements de plantation, 2 m x 2 m, 2.5 m x 2.5 m et 3 m x 3 m. Il est constitué de quatre répétitions pour un total de 24 unités expérimentales. Chaque échantillon de sol a été réalisé sur deux profondeurs (0-10 et 10-20 cm) et cela correspond à un total de 48 échantillons de sol. Pour avoir une référence, sept prélèvements de sol ont été effectués sur deux profondeurs (0-10 et 10-20 cm) donc un total de 14 échantillons dans un site de forêt non perturbé à proximité de notre dispositif expérimental. Les résultats de cette étude attestent que la concentration en carbone du sol augmente significativement avec la période sur les deux profondeurs d'échantillonnage (0-10 et 10-20 cm), mais elle demeure en dessous de la valeur obtenue sur le sol du site de référence. La concentration en azote quant à elle augmente significativement avec la période uniquement à la surface du sol dans la profondeur 0-10 cm et la valeur obtenue est au-dessus de la valeur obtenue sur le sol du site de référence. Enfin, le pH du sol augmente significativement avec la période sur les deux profondeurs d'échantillonnage (0-10 et 10-20 cm) et demeure en dessous de la valeur obtenue sur le sol du site de référence et se traduit par une diminution de l'acidité du sol. Aussi les plantes de *Jatropha curcas*

semées avec les boutures améliorent mieux l'acidité du sol que celles semées avec les graines. Le *J. curcas* est une plante qui répond efficacement aux besoins agricoles du moment tant sur le plan économique qu'environnemental car il est un palliatif à l'utilisation des engrais chimiques grâce à son action enrichissante des sols.

5.2 Perspectives

Cette thèse avait pour objectif général de restaurer les caractéristiques chimiques des sols tropicaux dégradés en cultivant le *Jatropha curcas*. Nous avons pu évaluer la capacité du *Jatropha curcas* à améliorer certaines caractéristiques chimiques des sols tropicaux humides dégradés (pH, carbone et azote). Cependant, elle offre encore plusieurs autres perspectives de recherches.

5.2.1 Amélioration de certaines caractéristiques physiques des sols

Les recherches futures pourront concerner d'abord sur l'évaluation de la masse volumique apparente du sol (exprimée en g par cm⁻³). Elle sera calculée en effectuant le ratio du poids sec de sol sur le volume initial après séchage à 105°C. Une masse volumique élevée indique une compaction plus importante du sol. Ensuite, elles pourront se concentrer sur l'évaluation du diamètre moyen pondéré (DMP) des agrégats du sol (en mm). Ce paramètre permet d'évaluer la stabilité structurale du sol. Nous pourrions utiliser la méthode décrite par (Poirier et al., 2018). Cette méthode se résume à placer un sous-échantillon de sol séché à l'air (~20 g) sur un ensemble de cinq tamis de taille différentes (ex : 2000 µm, 1000 µm, 500 µm, 250 µm). Le sol est tamisé dans l'eau par barattage manuel durant 10 minutes selon un mouvement de va-et-vient

vertical. Les proportions des classes de taille d'agrégats résiduels seront déterminées après séchage de chacune des fractions et le DMP calculé selon la formule

$$DMP (mm) = \sum_i^n \bar{x}_i w_i$$

Où » x_i représente le diamètre moyen entre deux tamis et w_i la proportion de la masse totale du sol des agrégats retrouvés dans une fraction donnée. Plus les agrégats sont résistants à l'action de l'eau, plus le DMP est élevé et plus la structure du sol est stable. Ainsi, des travaux futurs pourraient évaluer l'effet du *J. curcas* sur la stabilité de la structure de sol et sa masse volumique apparente afin de déterminer si le mode de multiplication et la densité de plantation influencent ses propriétés physiques.

Aussi, une étude pourrait focaliser sur l'évaluation de la densité de masse des racines du *J. curcas* (en $g\ cm^{-3}$ de sol). Ce paramètre permet d'évaluer l'occupation du sol par les racines. Il existe un compromis fondamental, dû à la densité de masse de racine, entre l'acquisition rapide des ressources et la conservation des ressources entre les espèces végétales. En conséquence, les espèces annuelles et les espèces à croissance rapide en général devraient maximiser l'acquisition de ressources, tandis que les espèces pérennes et à croissance lente devraient maximiser la conservation des ressources (Chapin III, 1980; Grime, 1977; Poorter et Garnier, 1999). Nous pourrions utiliser la méthode décrite par Poirier et al. (2018). Brièvement, cette méthode consiste à laver les racines sur un tamis de 250 μm immédiatement après que le sol ait été échantillonné. Afin d'évaluer l'occupation latérale du sol par les racines, nous pourrions mesurer la densité de masse des racines à 15 cm, 30 cm et 45 cm de distance du pied des plants. Uniquement les racines ≤ 2 mm seraient conservées pour être ensuite séchées et pesées. L'analyse de leur concentration en C et N pourrait aussi être effectuée. Ainsi, une telle étude nous renseignerait à savoir si le mode de multiplication

et la densité de plantation du *J. curcas* influencent le développement de son système racinaire et dans quelles mesures cela contribue à améliorer la qualité du sol.

5.2.2 Amélioration de certaines caractéristiques biologiques des sols

Des travaux futurs pourraient aussi se concentrer sur l'activité biologique du sol, notamment dans la zone immédiate exploitée par les racines des plantes (i.e., la rhizosphère). Ainsi, il serait pertinent d'évaluer dans quelles mesures le *J. curcas* est colonisé par les mycorhizes et les bactéries du genre *Enterobacter* et si des facteurs particuliers favorisent le développement d'une triple symbiose entre la plante, les champignons mycorhiziens et entérobactéries. Nous pourrions évaluer comment la diversité et l'intensité de l'activité microbienne dans la rhizosphère affecte la transformation et le stockage du C et de l'N dans la matière organique du sol. Ainsi, une telle étude nous renseignerait à savoir si le mode de multiplication et la densité de plantation du *J. curcas* influencent le microbiome de la rhizosphère et dans quelles mesures cela contribue à améliorer le recyclage des éléments nutritifs, la séquestration du carbone et la santé biologique du sol dans son ensemble.

ANNEXE A

HOW CAN PLANTS HELP RESTORE DEGRADED TROPICAL SOILS?

Renaud Massoukou Pamba^{1,2}, Vincent Poirier^{2,*}, Pamphile Nguema Ndoutoumou³, Terence Epule Epule².

1 Agriculture and Agri-Food Research and Development Unit of Abitibi-Temiscamingue, University of Québec in Abitibi-Temiscamingue, Notre-Dame-du-Nord, QC, JOZ 3B0, Canada; renaud.massoukoupamba@uqat.ca (R.M.P.); terenceepule.epule@uqat.ca (T.E.E.)

2 Ministry of Water and Forests, Sea, Environment, in Charge of the Climate Plan and the Land Use Plan, Libreville P.O. Box 199, Gabon

3 Laboratory of Plant Biotechnology, Department of General Agronomy, Institute of Agricultural and Forestry Research, National Centre for Scientific and Technological Research, Libreville P.O. Box 2246, Gabon; pamphilen@hotmail.com

* Correspondence: vincent.poirier@uqat.ca; Tel.: +1-819-762-0971

A.1. Abstract

In the tropics, anthropogenic activities can lead to water and wind erosion, a loss of biodiversity, and a reduction in sequestered carbon, fertility, and organic matter content

in the soils concerned, potentially resulting in their degradation. This study therefore aims to identify the mechanisms used by plant species to restore degraded tropical soils and plant species characteristics that are best suited to achieve this through a critical scoping review of the peer-reviewed literature. Soil restoration leads to the re-establishment of ecosystem services and an increase in soil production potential, the regeneration of biodiversity, the stopping of organic matter losses, and the creation of favorable conditions for carbon sequestration and nitrogen fixation. The choice of appropriate plant species depends on the restoration objectives to be achieved. Five key mechanisms by which plant species contribute to restore degraded tropical soils include: (1) nitrogen fixation, (2) carbon sequestration, (3) organic matter addition, (4) structure stabilization, and (5) erosion control. The main characteristics of plant species and vegetation involved in these mechanisms are (a) the capacity to form symbiotic associations with N-fixing bacteria and mycorrhizae, (b) the production of abundant root biomass releasing litter and exudates, (c) roots having a high length density, branching intensity, and depth distribution, (d) the production of an abundant and easily decomposed above ground litter, (e) the production of a vast canopy, and (f) the presence of different vegetation strata. Targeting these characteristics will contribute to acting on several mechanisms simultaneously, which will increase the chance of success in tropical soil restoration.

Keywords: plant species, soil degradation, soil restoration, mechanisms, characteristics, tropical soils.

Résumé

Sous les tropiques, les activités anthropiques peuvent entraîner une érosion hydrique et éolienne, une perte de biodiversité et une réduction du carbone séquestré, de la fertilité

et de la teneur en matière organique des sols concernés, ce qui peut entraîner leur dégradation. Cette étude vise donc à identifier les mécanismes utilisés par les espèces végétales pour restaurer les sols tropicaux dégradés et les caractéristiques des espèces végétales les mieux adaptées pour y parvenir, grâce à une analyse critique de la littérature évaluée par les pairs. La restauration des sols conduit au rétablissement des services écosystémiques et à l'augmentation du potentiel de production des sols, à la régénération de la biodiversité, à l'arrêt des pertes de matière organique et à la création de conditions favorables à la séquestration du carbone et à la fixation de l'azote. Le choix des espèces végétales appropriées dépend des objectifs de restauration à atteindre. Les espèces végétales contribuent à la restauration des sols tropicaux dégradés par cinq mécanismes clés : (1) la fixation de l'azote, (2) la séquestration du carbone, (3) l'apport de matière organique, (4) la stabilisation de la structure et (5) le contrôle de l'érosion. Les principales caractéristiques des espèces végétales et de la végétation impliquées dans ces mécanismes sont (a) la capacité à former des associations symbiotiques avec des bactéries fixatrices d'azote et des mycorhizes, (b) la production d'une biomasse racinaire abondante libérant de la litière et des exsudats, (c) des racines ayant une densité de longueur, une intensité de ramification et une distribution de profondeur élevées, (d) la production d'une litière aérienne abondante et facilement décomposable, (e) la production d'une vaste canopée, et (f) la présence de différentes strates de végétation. Le ciblage de ces caractéristiques contribuera à agir simultanément sur plusieurs mécanismes, ce qui augmentera les chances de succès de la restauration des sols tropicaux.

Mots clés : espèces végétales, dégradation des sols, restauration des sols, mécanismes, caractéristiques, sols tropicaux.

A.2. Introduction

The world's population is constantly growing. Estimates put the number of inhabitants at over 8.05 billion in 2023, with a projection of 9.70 billion in 2050 and 10.35 billion in 2100 [1,2]. This population growth is associated with an increased pressure on natural resources such as water and soil [3]. Indeed, soil is increasingly solicited for multiple crops to achieve food self-sufficiency. This pressure on soil opens the debate on the renewable nature of soils. Girgenti et al. [4] argue that soils are non-renewable, while several other studies show that soils can indeed be renewed in quantity and quality through agroecology and conventional options [5,6]. Soils have been described as the bedrock of life on earth [7] and are derived from the degradation of the parent rock through physical, chemical, and biological processes [8]. It is the primary resource on which life develops worldwide [9] and is a diversified and structured habitat where several resources such as water, carbon (C), nitrogen (N), and organic matter are stored [9,10]. However, soils are variable, and require a great deal of effort, complex analysis, and multidisciplinary knowledge [11] to understand the processes leading to their formation, functioning, and degradation.

Soil quality can be defined as the capacity of a soil to host and provide ecosystem services [9,12,13]. Soil is said to be healthy when it can withstand stress and disturbance, recycle nutrients, transform organic matter, and support microbial life [14,15]. To assess the quality or health of a soil, we need to focus on (i) physical properties such as the stability of its structure and its level of compaction, porosity, and infiltration capacity, (ii) chemical properties such as pH and its concentrations of nutrients (particularly N), and (iii) biological properties such as root growth, biodiversity, and organic matter and C content [9]. Healthy soils perform several ecosystem services such as (1) the retention, filtration, and purification of water, (2)

the production of biomass and food for humans and animals, (3) the provision of habitat for organisms and the conservation of biodiversity, (4) the regulation of climate at local and global scales, (5) the recycling of nutrients, and (6) the provision of a stable physical support for plant species [9,16,18]. Unfortunately, soil health can deteriorate either due to anthropogenic reasons, and is therefore linked to human activities, or due to natural causes, and is therefore linked to climate change and other related factors [9,19]. Demographic pressure leads to the intensive exploitation of soils, resulting in their degradation characterized by wind and water erosion, pollution, a loss of biodiversity and organic carbon, and a loss of macro (N, P, K) and micronutrients (Zn, Cu, Mo), as well as increased toxicity in certain elements (Al, Mn, Fe) [16]. Soil degradation causes a reduction in expected ecosystem services and leads to a decline in soil quality and productivity [9,20,21].

The tropical zone extends on either side of the equator, between the Tropic of Cancer (23°27' north latitude) and the Tropic of Capricorn (23°27' south latitude); it covers 45% of the world's forest area and around 8.2 billion hectares, or around 40% of the planet's land [17]. Due to various human activities such as deforestation and extensive agriculture, soil in the tropical zone is subject to degradation. A strong correlation between soil degradation and forest loss in the Congo Basin has been observed [19]. However, soil is of vital importance for agriculture and the environment. Hence, it is imperative to have more arable soil to produce more food. It would therefore be expedient to develop alternative ways of restoring degraded tropical soils. The remediation of these soils will make it possible to regain more arable land, limit deforestation, and protect soils and forests threatened by overexploitation. The restoration of degraded tropical soils involves stopping existing degradation processes and restoring the soil's physiochemical characteristics [16,17,22]. Several soil restoration methods and strategies are described in the literature. One of these is phytoremediation, which involves using plants and soil microbes to obtain the twin

objectives of a reduced concentration of toxic contaminants and to restore soil quantity and quality [17,23]. In this study, the term phytoremediation is used in the context of restoring soil quantity and quality. From an etymological point of view, “*phyto*” means “plant” in Greek and “*remedium*” means “restore balance” in Latin. Indeed, the cultivation of plant species promotes soil restoration [17,24,28] by providing organic matter and making them more fertile [29].

Currently, there are no critical reviews that examine the potential of plants in restoring tropical soils. The current studies that exist are individual based studies that focus on phytoremediation [30,32] without examining the actual characteristics of the plants concerned. This work is original and offers a major contribution in that it goes beyond by bringing together a critical perspective of the knowledge scattered in several studies. This literature review aims to respond to the following question: “What are the mechanisms used by plant species to restore degraded tropical soils, and which plant species characteristics are best suited to achieving this?” To this end, we will first define the key words used in this work, then provide an overview of the mechanisms used and the characteristics of species involved in the restoration of degraded tropical soils and give examples of plant species that contribute to achieving this goal.

A.3 Methodology

Our approach was inspired by the guidelines given to perform systematic reviews, which is a scientific method that combines the results of several independent studies on a well-defined problem to perform a rigorous secondary analysis of the primary results [33,35]. Our approach was inspired by the PRISMA statement [36]. However, our work is not a systemic review as we did not follow point-by-point the 27-item

checklist recommended [36]. This work is a critical scoping review that synthesizes key trends on the use of plant species for the restoration of degraded tropical soils. Firstly, we based our review on a clearly formulated question. Next, we specified explicit methods and criteria for the inclusion or exclusion of articles for our critical scoping review (see Table A.1).

Table A.1 Summary of inclusion and exclusion criteria used in this review.

Category	Inclusion Criteria	Exclusion Criteria
1. Literature type	Peer-reviewed publications	Gray literature and non-reviewed documents
2. Languages	Documents published in French and English	Documents in all other languages
3. Topics	Documents on the restoration of degraded tropical soils using plant species	All other themes
4. Geography	Tropical zone	All other parts of the globe
5. Period	Documents published between 1993 and 2023	Documents published before 1993
6. Database	Google Scholar and Scopus	All other databases

The type of literature used was solely peer-reviewed; gray and non-reviewed literature was omitted since we considered it as non-standardized knowledge. The present study is based on data collected from the French and English scientific literature documenting the restoration of degraded tropical soils. The search terms we used were “plant species characteristics”, “tropical soil degradation”, “tropical soil restoration”, and “tropical soil restoration mechanisms”. We focused on soils of the tropical zone; according to

Michéli et al. [37], there are eight major soil groups found in tropical environments (see Table A.2). We focused on articles published over the last 30 years,

i.e., between 1993 and 2023. The articles were acquired using Scopus and Google Scholar search engines since they provide easy access to the primary literature on the topics of interest. Several potentially relevant publications were selected from the initial search and duplicates were removed after importing the articles into the EndNote software. Overall, a total of 160 references were used. A schematic representation of our approach is presented in Figure A.1.

Table A.2 Classification of tropical soils into eight main groups

Soil Group	General Description	Geographical Distribution	References
Acrisols	Soils with a higher clay content in the subsoil than in the topsoil. At certain depths, they have a low base saturation and low clay content.	Humid tropical, humid subtropical, and warm temperate regions, widespread in Southeast Asia, the Amazon, the southeastern United States, and east and west Africa.	[38,41].
Ferralsols	Deeply weathered, red, or yellow soils typical of the humid tropics, rich in primary minerals and kaolinite.	Worldwide extent estimated at around 750 million hectares, almost exclusively in the humid tropics on the continental shields of South America and Africa.	[41,44].

Table A.2 suite

Fluvisols	Young soils formed in alluvial deposits, having a profile with signs of stratification and little horizon differentiation.	Present on every continent and in every climate, they occupy some 350 million hectares, with more than half of them in the tropics.	[41,45,46].
Lixisols	Soils with a higher clay content in subsoil than topsoil. They have a high base saturation and low clay content at certain depths.	Found in tropical, subtropical, and warm temperate regions, seasonally dry, on Pleistocene and older surfaces.	[41,47,49].
Luvisols	Soils with a higher clay content in subsoil than topsoil. They have highly active clays in the clay horizon and a high base saturation at certain depths.	Covers 500 M to 600 M ha worldwide, mainly in temperate, subtropical, and tropical regions.	[41,50,52].
Nitisols	Deep, well-drained, red tropical soils with >30% clay subsoil and a stable structure.	Around 200 M ha worldwide, more than half of which are in tropical Africa, notably on the high plateaus (>1000 m) of Ethiopia, Kenya, Congo, and Cameroon.	[41,53,55].
Plinthosols	Soils containing plinthite, a mixture of kaolinitic clays rich in Fe and/or Mn.	Found in the humid tropics, notably in the eastern Amazon basin, the central Congo basin, and parts of southeast Asia.	[41,56,58].
Vertisols	Clay soils, with a high proportion of swelling clays, forming wide, deep fissures when they dry out.	Found mainly in semi-arid tropical regions but also in humid tropical regions such as Trinidad.	[41,59,60].

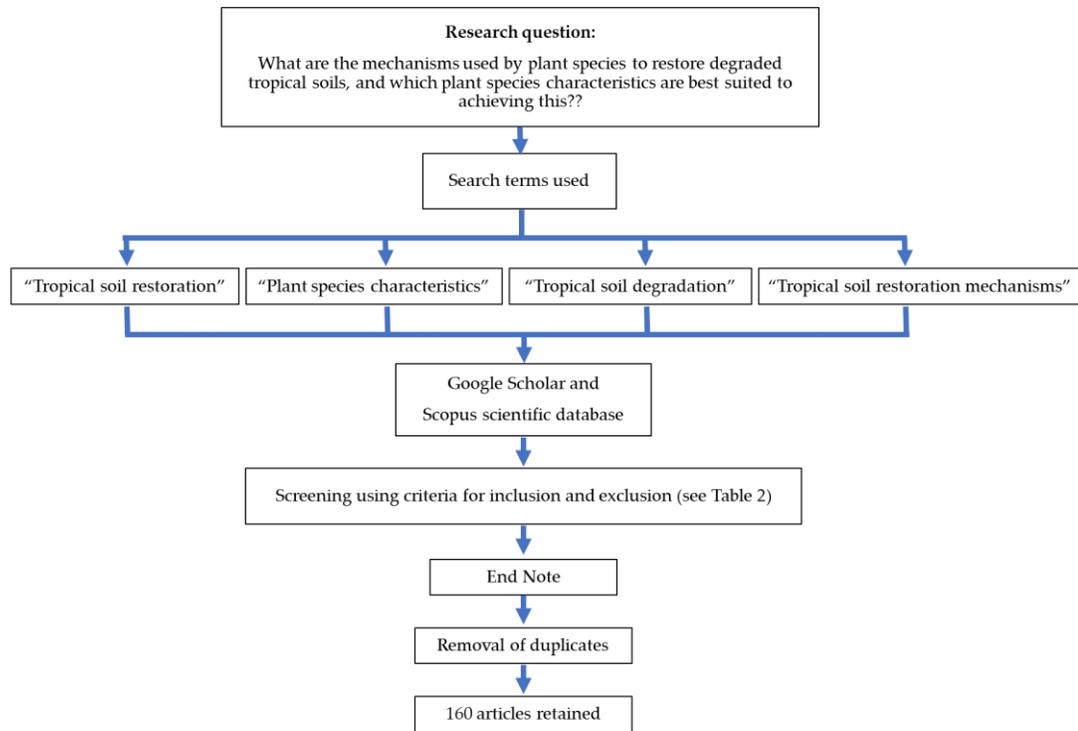


Figure A.1 Schematic representation of the methodological approach used to select articles in this critical scoping review.

A.4 Results and Discussion

A.4.1 Tropical soil degradation and importance of their restoration

In the tropics, physical soil degradation takes the form of desertification, compaction, runoff, and erosion [61], chemical soil degradation leads to acidification, salinization,

leaching, and pollution [9,61], and biological soil degradation results in the loss of biodiversity, organic matter, and the capacity to sequester C and fix N [9,14,21]. Anthropogenic activities such as excessive tillage, deforestation, biomass burning, compaction, and overexploitation are the main causes of tropical soil degradation [62,63]. Lal [9] and Lahmar and Ruellan [22] state that soil resilience is the ability of a soil to restructure, regenerate, and provide ecosystem services after anthropogenic or natural disturbances. Restoring degraded tropical soils involves rebuilding soil structure and the ecological processes associated with it. This involves restoring the soil's production potential, renewing biodiversity, stopping organic matter losses, creating conditions that are favorable for C sequestration and N fixation [9,22], and improving soil aggregation and structural stability [64]. Most of the food produced to feed human beings in the tropics and elsewhere comes from the soil. The absence or deficit of cultivable soil will immediately translate into famine. To avoid this, it is important, if not essential, to examine and put into practice all possible methods of restoring degraded tropical soils. Restoring degraded tropical soils is a global priority to increase food security and regulate the climate globally [65].

A.4.2 Involving plants in the restoration of degraded tropical soils.

In this study, five major mechanisms by which plant species can contribute to restoring degraded tropical soils were identified (Figure A.2 and Table A.3). These are nitrogen fixation, carbon sequestration, organic matter addition, soil structure stabilization, and wind–water erosion control. These mechanisms will be described, followed by examples of plant species that promote them, and then the characteristics of the

targeted plant species will be highlighted. Thereafter, the limits associated with each mechanism will be discussed.

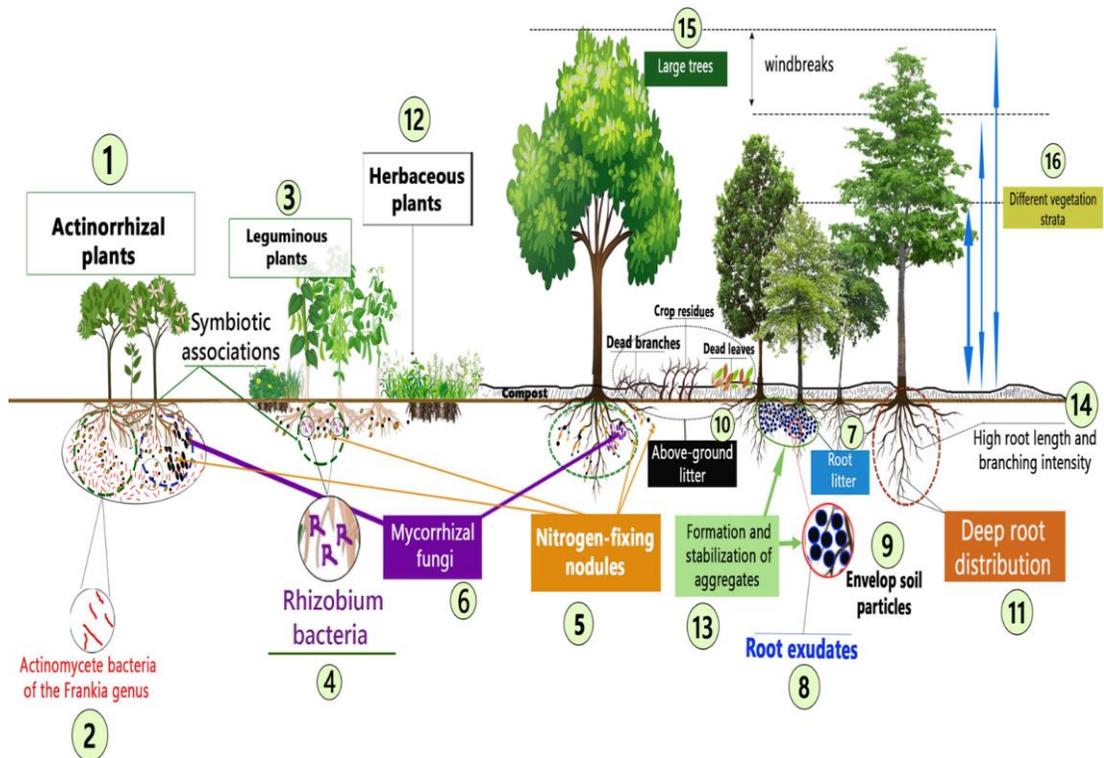


Figure A.2 Characteristics and mechanisms of plants species that play a positive role in the restoration of degraded tropical soil. See Table A.3 for a detailed explanation associated with each reference number.

Table A.3 Mechanisms by which plants can help restore degraded tropical soils and characteristics of associated species.

Restoration Mechanisms	Plant Characteristics (numbers in parenthesis refer to those shown in Figure 2)
Nitrogen fixation	✓ Actinorhizal plants (1) have the capacity to form symbiotic associations with actinomycete bacteria of the Frankia genus (2) to fix atmospheric N in the soil.
	✓ Leguminous plants (3) can form symbiotic associations with bacteria of the Rhizobium genus (4) to fix atmospheric N in the soil.
	✓ The roots of both actinorhizal (1) and leguminous (3) plants are characterized by nitrogen-fixing nodules (5).
	✓ Both actinorhizal (1) and leguminous (3) plants can also associate with mycorrhizal fungi (6), forming tripartite symbiotic associations.
Carbon sequestration	✓ Actinorhizal (1) and leguminous (3) plants have the capacity to form symbiotic associations with N-fixing bacteria (2,4) and to promote carbon sequestration.
	✓ Carbon sequestration in the soil is also increased by the presence of mycorrhizal fungi (6) which form symbiotic associations with plant roots.
	✓ Plant roots produce litter (7) and exudates (8) released in the soil that envelop soil particles (9), stimulate microbial activity, and promote carbon sequestration.
	✓ Plants that provide abundant and easily decomposable litter aboveground (10) contribute to increased carbon sequestration in superficial soil layers.
Organic matter addition	✓ Plants with increased root depth distribution (11) favor C sequestration in deep soil.
	✓ Herbaceous plants (12) provide an abundant litter that can be easily decomposed (7, 10), contributing to nutrient recycling and improving soil fertility.

	<ul style="list-style-type: none"> ✓ The addition of organic matter in the form of dead leaves and branches and crops residues (10) nourishes soil biota and increases its fertility.
Structure stabilization	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Root litter (7) and exudates (8) promote aggregate formation and stabilization (13). ✓ Plants' symbiotic associations with mycorrhizae (6) favor the stabilization of soil micro- and macroaggregates. ✓ High root length and branching intensity (14) enmesh soil particles and contribute to aggregate formation and stabilization. ✓ Increased root depth distribution (11) stabilizes soil structure throughout the profile. ✓ Large trees (15) form a vast canopy that attenuates the intensity of rainfall and reduces its impact on aggregate break-up. ✓ The presence of different vegetation strata (16) reduces the force and intensity of raindrops and limits their negative impact on soil structure.
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ The production of abundant litter (10) and the presence of herbaceous plants (12) protect the soil surface, slow water movement, and limit particle transport. ✓ Large trees having a vast canopy (15) and vegetation with different strata (16) attenuate rainfall intensity and limit soil particle dispersion and losses. ✓ Vegetation with different strata (16) provides natural windbreaks and reduce wind speed, both of which limit soil losses through wind erosion. ✓ Roots with high length and branching intensity (14) as well as a high depth distribution (11) increase soil macroporosity, reduce compaction, and promote water infiltration in soil.
	Erosion control

A.4.3 Nitrogen fixation to restore degraded tropical soils

A.4.3.1 Mechanisms of nitrogen fixation by plant species

Some plant species develop symbiotic mechanisms for fixing atmospheric N in the soil, thereby helping to regenerate soil fertility and improve crop yields [66]. According to Duponnois et al. [67], plants in the legume family (Fabaceae) are renowned for their ability to restore degraded soils by symbiotically associating with bacteria of the genus *Rhizobium* which can fix atmospheric N into soil N [27]. Actinorhizal plants form symbiotic associations with actinomycete bacteria of the *Frankia* genus [68] and are also capable of fixing atmospheric N into soil N. It is thanks to nodules located on the roots that leguminous and actinorhizal plants develop symbiotic nitrogen-fixing mechanisms [67]. In line with this mechanism, the characteristics of target plants are therefore the capacity to form nodules and the possession of symbiotic genes carried by plasmids, in accordance with the work of Benabdoun et al. [66]. The development of a tripartite symbiotic association between bacteria of the genus *Rhizobium* or *Frankia* and mycorrhizal fungi is also a feature developed by certain plant species. This association enriches the soil and improves its fertility thanks to the ability of *Rhizobium* and *Frankia* to fix atmospheric N and that of mycorrhizae to explore the soil's superficial and deep horizons to acquire resources [69,70].

A.4.3.2 Examples of nitrogen-fixing plant species for restoring degraded tropical soils

Benbrahim et al. [70] affirmed in their study that *Acacia* species are atmospheric Nfixing plants which enrich and improve the fertility of tropical soils. A stand of *Faidherbia albida* with a density of 50 trees ha⁻¹ produces litter that reintroduces into the soil each year the equivalent of 75 kg N ha⁻¹ along with other nutrients, i.e., 12, 13, 20, 25, and 120 kg ha⁻¹ of P, K, S, Mg, and Ca, respectively [70]. Cowpea (*Vigna unguiculata*) is a tropical legume capable of fixing between 32 and 89% of its N requirements [71]. The cultivation of groundnuts (*Arachis hypogaea*), a legume grown for human consumption, fixes 8 to 23 kg N ha⁻¹ in the soil, thus increasing soil mineral N by 13 to 40% [72]. The results of a study carried out by Azontonde et al. [73] on the cultivation of *Mucuna pruriens* (var. utilis) as a cover legume crop show that this species contributes 290 kg N ha⁻¹ to the soil, as well as 100, 240, 100, 5320, and 40 kg ha⁻¹ of P, K, Mg, C, and Ca, respectively. Thus, *M. pruriens* (var. utilis) strongly favors the restoration of degraded tropical soils due to its high capacity for atmospheric N fixation and its strong limitation of erosion and runoff [73]. Dommergues [74] states that plants of the *Alnus* and *Casuarina* genera are among the actinorhizal plants with the greatest capacity to fix atmospheric N. Benabdoun et al. [66] have demonstrated that the tropical woody species *Casuarina glauca* is drought-resistant and makes a significant contribution to restoring degraded soils. In Egypt, the actinorhizal plants *Casuarina equisetifolia*, *Casuarina cunninghamiana*, and *C. glauca* have been shown to restore degraded soils; they can fix up to 116 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ two years after sowing [66]. Plants of the *Casuarina* genus can therefore rapidly restore soil fertility. The

findings of a study conducted by Coulibaly et al. [64] affirm that growing *Jatropha curcas* increases total nitrogen in the soil microaggregate fraction.

Altogether, these results indicate that the following plant characteristics are suitable to enrich tropical soil N concentration and contribute to their restoration: (i) being actinorhizal and leguminous plants, (ii) possessing symbiotic genes that maximize the formation of symbiotic associations with actinomycete bacteria of the Frankia genus and bacteria of the Rhizobium genus, and (iii) being capable of forming tripartite symbiotic association with mycorrhizal fungi.

A.4.4 Carbon sequestration to restore degraded tropical soils

A.4.4.1 Carbon sequestration mechanisms

In this study, the focus is on biotic carbon (C) sequestration mechanisms, i.e., those linked to the biological activities of plants, fauna, and microorganisms [75,78]. Carbon sequestration can be defined as the fixation and stabilization of C in the soil in the form of organic matter over a long period, such as 50 years [79]. According to Lützow et al. [80], recalcitrance to decomposition, occlusion into micro- and macroaggregates, and organomineral interactions are the main mechanisms leading to organic C sequestration in soil. Lal [9] estimates that 10 to 15 g C kg⁻¹ of soil corresponds to a minimal critical threshold of soil carbon concentration. Any practices that contribute to increasing organic C concentration above this critical threshold would help restore degraded soils [9,81]. Mycorrhizae located on the roots of plant species and roots themselves have the capacity to sequester organic carbon, stabilize soil structure, and thus restore it [82,83]. According to Cotrufo et al. [84], organic residues easily

decomposed by microorganisms could lead to increased C sequestration; the microbial products of decomposition could promote aggregation and organo–mineral interactions.

A.4.4.2 Examples of plant species to sequester C and restore degraded tropical soils

Belowground plant biomass plays an important role in the soil C sequestration process [85]. Jones et al. [77] argue that 27% of the C sequestered in the soil is derived from root mechanisms, of which 11% is contributed by rhizo deposits and 16% by root biomass. Herbaceous plants are monocotyledons that produce high root biomass [86], which would lead to significant organic C sequestration and potentially a good level of soil restoration. They also produce biomass that can be easily decomposed and consequently increase C concentration in superficial soil layers [87]. The characteristics of plant species that contribute to sequestering organic C in the soil are also closely linked to root traits of an architectural, morphological, chemical, physiological, and symbiotic nature [88,89]. According to [81], plant species producing a high root biomass with a high lignin and suberin content contribute to sequestering organic C in the soil through the mechanism of recalcitrance against decomposition and could consequently contribute to restoring degraded soils. Increased root depth distribution is also favorable for C sequestration in deep soil layers [88].

Plant species grown as cover crops such as sorghum (*Sorghum bicolor* L.), maize (*Zea mays* L.), soy (*Glycine max.* L.), and beans (*Phaseolus vulgaris*) protect the soil against degradation and sequester C [81]. Kang et al. [90], in a study carried out in Nigeria on an intercropping association of living hedges of two legume species, *Gliricidia sepium*

and *Leucaena leucocephala*, obtained a 15% (i.e., 2.38 Mg C ha⁻¹) improvement in soil organic C stocks between 0 and 25 cm depth in 12 years, compared with single crops. In Hawaii, the conversion of pasture soils to Eucalyptus plantations increased C stocks by 17.5% between 0 and 1 m soil depth after 7 years [91]. In Madagascar, coppicing *Eucalyptus robusta* in the highlands resulted in an increase in stored C of 38 Mg ha⁻¹ compared with the original savannah, mainly via the stumps and root system [92]. The cultivation of *Inga edulis* in hedgerows in Peru by [93] also resulted in a 12% (i.e., 0.23 Mg C ha⁻¹) increase in soil organic C over 6 years. In Brazil, a soil receiving fresh plant biomass mulch from sugarcane (*Saccharum officinarum*) residues for 6 years was richer in C than a soil cultivated with residue burning for 50 years, with total C content of 4.2 g kg⁻¹ at a depth of 0–5 cm (+20%) and 3.0 g kg⁻¹ at a depth of 0–10 cm (+15%), representing an average annual gain of 0.45 t C ha⁻¹ yr⁻¹ at a depth of 0–5 cm and 0.65 t C ha⁻¹ yr⁻¹ at a depth of 0–10 cm [94]. The study by Graham [95] in South Africa on a ferralitic clay soil cultivated with unburnt sugarcane and mulched with crop residues for 59 years concluded that soil C content increased by 12 g C kg⁻¹ at a depth of 0–5 cm, of which only 0.5 g C kg⁻¹ was in the light organic fraction (density < 1.7), made up mainly of coarse organic matter; most of the C was thus found in denser fractions where it was likely stabilized by organomineral interactions. The study conducted by [64] led to the conclusion that *Jatropha curcas* cultivation increases total soil organic carbon in the microaggregate fraction and can sequester an average of 1.33 g C kg⁻¹ year⁻¹. In India, a research station located in Patancheru concluded that growing *Jatropha curcas* in a 4-year plantation fixed 3.07 kg C per plant, an increase of 19% compared to adjacent grasslands [96]. The results of a study conducted in Senegal in 2017 on allometric equations and carbon stock in the biomass of *Jatropha curcas* L. trees revealed that plantations stored about 1200 kg C ha⁻¹ in belowground biomass after 5 years [97].

Plant species characteristics that could promote C sequestration mechanisms and contribute to restore tropical soils are (i) abundant root production which provides litter and exudates stimulating microbial activity, (ii) the capacity to form symbiotic association with N-fixing bacteria and mycorrhizal fungi, (iii) increased depth distribution of the root system, and (iv) the production of abundant and easily decomposable litter aboveground.

A.4.5 Organic matter addition to restore the fertility of degraded tropical soils

A.4.5.1 Soil fertility and organic matter addition mechanisms

In the absence of exogenous organic amendments such as manure or compost, organic matter in the soil is contributed by the restitution of plant biomass, i.e., leaves, roots, stems, crop residues, and senescent organs [98]. It is difficult to dissociate soil fertility and organic matter; these two characteristics go hand in hand and are complementary, as they are regulated by the chemical, physical, and biological properties of the soil [99]. The mechanisms for rebuilding soil fertility rely on the mineralization of (i) fresh and decomposed organic matter [100,101], (ii) microbial products [99,102], and (iii) soil organic matter [102]. The two elements that come into play in the impact that the addition of organic matter can have on the soil are (i) the quantity of organic matter added and (ii) its chemical composition, which affects its capacity to be degraded. Several authors agree that plant biomass consisting mainly of leaves and roots helps to maintain or even increase soil organic matter and fertility [98,103].

A.4.5.2 Examples of species that provide organic matter to restore tropical soils' fertility

The cultivation of perennial plants is useful for the restoration of degraded tropical soils, as they provide a permanent plant cover that can maintain soil fertility and combat erosion [104,105]. The diversity of species and mechanisms that take place in agroforestry systems, due to biological diversity and greater plant biomass productivity, increase soil fertility and organic matter, thus helping to restore degraded soils [104,106]. The cultivation of cover crops such as sorghum (*Sorghum bicolor* L.), maize (*Zea mays* L.), soya (*Glycine max.* L.), and beans (*Phaseolus vulgaris*) improves soil fertility and maintains its organic matter content [107]. In a cocoa (*Theobroma cacao* L.) plantation in Cameroon, aboveground plant biomass consisted of 60–70% leaves, 20–30% stems, and 7–10% flowers and fruits; the soil amended with this biomass benefited from about 1–2, 75–100, 30–75, 5–6, and 35–40 kg ha⁻¹ an⁻¹ of P, K, Mg, N, and Ca, respectively. The natural shade offered by the vegetation increases the percentage of moisture at the soil surface, thus promoting the decomposition of plant biomass [108]. The species *Acacia mearnsii* is a cultivated plant for the restoration of tropical degraded soils as it produces nearly 25,000 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ of fresh leaves, providing 245 to 255 kg N ha⁻¹ annually [70,109]. In a 14- and 34-year-old *Pinus Kesiya* forest plantation, Njoukam et al. [103] obtained plant biomass production of 8293 and 9867 kg ha⁻¹ yr⁻¹ made up of 74 and 86% leaves, respectively. Tree roots also increase organic matter, stimulate microbial activity, enhance mineral bioavailability, and improve soil fertility and quality [9,22]. Mulching crop residues and installing cover crops increases soil organic matter and stimulates earthworm activity [110]. Cultivation of *Jatropha curcas* to restore degraded soils in India yields around 550 g of dry leaves per plant annually added to the soil by litterfall, resulting in

an increase in dry biomass of 305 kg C ha⁻¹ year⁻¹ [96]. This translates into an increase in soil organic matter but also an overall increase in soil fertility linked to a growth in microbial activity under *Jatropha curcas* [96].

Among the characteristics of plant species that promote the addition of organic matter to rebuild soil fertility are (i) the production of abundant litter on the soil surface via the fall of aerial organs, (ii) the production of abundant litter in the soil by root biomass, and (iii) the capacity of above- and belowground biomass to be decomposed to feed the soil.

A.4.6 Structure stabilization to restore degraded tropical soils

A.4.6.1 Mechanisms of soil structure stabilization by plant species

According to many authors, the roots of plant species influence the biotic mechanisms of aggregate formation and stabilization [88,111,112]. The mechanisms involved in soil structural stabilization are (i) the envelopment of macroaggregates by decomposition products, (ii) the production of root exudates and microbial polysaccharides that act as binding agents between soil particles and stimulate microbial activity, (iii) the entanglement by roots and hyphae that enhance particle and aggregate agglomeration, and (iv) the alignment and compression of soil particles that promote their adhesion [89,113,114]. Thanks to their aerial parts, plants attenuate the intensity of raindrops and their impact on the breakdown of soil aggregates, thereby improving soil structural stability [115,116]. Abiven et al. [117] believe that the decomposition of plant biomass promotes aggregate stability; the faster it decomposes, the better the stability of the aggregates.

Roots also have a major influence on soil aggregate and structural stability. They compress and align soil particles, produce exudates whose chemical composition influences their use by microorganisms, and affect the composition of bacterial fungal communities [118]. Root exudates rich in polymerized sugars act as a binder between solid particles, improving soil structural stability [115,119]. Root characteristics that help stabilize soil macroaggregates include high root length density and high root branching intensity [88,120,121]. Roots with a high concentration of polyphenols can react with soil proteins to form macromolecules that improve aggregate stability [88,114,122]. The combined effect of microbial activities in the mycorrhizosphere with root growth and hyphal length improves aggregate stability in the soil [123,124]. Aggregate stability is also enhanced by the decomposition of deciduous leaves falling from trees via the soil's microbial biomass, which exudes microbial products that act as binding agents between soil particles [64,125].

A.4.6.2 Examples of species that stabilize soil structure to restore degraded tropical soils

Plant species capable of forming mycorrhizal associations such as *Pinus halepensis*, *Shorea pinanga*, *Acacia mangium*, and species from the genera *Eucalyptus*, particularly *E. urophylla*, contribute to the formation of stable aggregates and the restoration of degraded tropical soils [89]. Aggregate stability is also enhanced by high root length and mycelial hyphae density [126]. Soil aggregation and structural stability are enhanced by the hyphae of mycorrhizal fungi located on plant root systems [104,127]. The study carried out by Poirier et al. [88] in a Mediterranean climate attest that, on average, the 13 plants studied increased stable soil macroaggregates by 13%

compared with bare soil. However, under the species *Sanguisorba minor*, the increase in soil macroaggregates reached 40%. In a study carried out in Tunisia, Annabi et al. [115] asserted that the association of wheat (*Triticum* sp.) and faba bean (*Vicia faba*) contributes strongly to the stability of soil aggregates and helps prevent water erosion. The effects were observed from the third month after sowing and continued for up to four months after harvest. The concentration of water-stable aggregates in soil amended with *Lolium rigidum* and *Scutellospora calospora* mulch increased to 84 and 143 g kg⁻¹ soil; mulch addition resulted in 63% and 147% increases in the quantity of water-stable aggregates compared to the unamended control soils, respectively [128]. In Brazil, mulch made from fresh plant biomass of sugarcane (*Saccharum officinarum*) residues improved soil structural stability at a depth of 0–5 cm, with 17% more stable macroaggregates in unburnt sugarcane fields compared to burnt fields [94]. Short-term (10 weeks) pot cultivation of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) significantly improved soil structural stability via inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi [123,124]. Degraded soils under *Jatropha curcas* cultivation have observed an increase in macroaggregation, which promoted soil structural stability and contributed to soil restoration [64,129].

From the abovementioned results, we identified the following characteristics of plant species which can promote tropical soil structural stability and contribute to its restoration: (i) the production of abundant root litter and exudates, (ii) the capacity to form symbiotic association with mycorrhizal fungi, (iii) the production of roots having a high length density and branching intensity and an increased depth distribution, and (iv) the capacity for trees to grow in height with vast canopy and the combination of different vegetation strata to reduce the intensity of rain drops and the associated breakdown of soil aggregates.

A.4.7 Controlling water and wind erosion to restore degraded tropical soils

A.4.7.1 Mechanisms to control water and wind erosion

The mechanisms that enhance the slowing down of water erosion are (i) the slowing of rainfall intensity by foliage strata, which reduces the force of the impact of raindrops [130], (ii) the plant biomass on the soil surface (leaves, roots, and grasses), which acts as an obstacle to the movement of water and the transport of soil particles [130], (iii) the deep roots of trees, which stabilize soil structure and limit erosion [131,132], and (iv) the presence of organic horizons in the soil, which regulates water infiltration and limits the runoff of soil particles [133]. To control wind erosion, we need to (i) grow plant species that can create windbreaks made up of trees, shrubs, or bushes which regulate and reduce the speed of wind without stopping it completely and (ii) add mulch to crops by installing a plant cover to protect the soil and thus preserve its water reserves [134].

A.4.7.2 Examples of plant species to control erosion and restore degraded tropical soils

The cultivation of plants helps to regulate the infiltration of runoff water into degraded soils and counteract the negative impact that excessive sunshine can have on the soil [107,135]. In this respect, Rey et al. [130] assert that plants with a high aboveground plant biomass intercept raindrops and reduce the intensity of their impact on the soil. Mazour et al. [136], in a study carried out in Algeria, established that natural plant cover reduces water erosion to around $0.4 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ of soil lost, a reduction of

about 93%, compared with bare soil where soil losses are about $5.3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. This study showed that vegetation cover does not only limit soil erosion by facilitating water infiltration but also increases soil fertility and greatly improves its structural stability [136]. Similar results were obtained by Morsli et al. [137] in the same country, with a reduction in water erosion from 3 to 6 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ of soil lost on bare soil to around $0.8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ of soil lost on soil under plant cover. Berkane et al. [138] showed that the intensity of water erosion decreased from 73 to 63 $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ of water in western Algeria under forest cover, compared with areas without plant cover where erosion was much more intense. In Madagascar, Douzet et al. [139] achieved a reduction in runoff and erosion coefficients of less than 15% on soils cultivated with cover crops of maize (*Zea mays* L.), beans (*Phaseolus vulgaris*), and rice (*Oryza sativa*), despite an average rainfall of over 1300 mm, compared with soils with ploughed plots. Degraded soils under *Jatropha curcas* cultivation benefited from reduced water erosion [96,129,140]. This could be due to increased water infiltration in the soil since the cultivation of *Jatropha curcas* can increase in the weighted mean diameter of soil aggregates by 11% compared to that of the native vegetation [64]. The results of Ouattara et al. [141] showed that a quantity of 2 Mg ha^{-1} of mulch is necessary and sufficient to control runoff and erosion, improve infiltration, and conserve sufficient moisture. In their study, the runoff coefficient varied from 55% to 16% under plant cover compared with 94% under ploughing without mulching [141].

Mulching has proved effective also in controlling wind erosion. Millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. B.] straw application rates of 2 Mg ha^{-1} , providing a soil cover rate of 7 to 10%, could reduce wind sediment fluxes by 40 to 60% at 10 cm above ground level [142,143]. The study carried out by Tidjani et al. [144] on a sand dune bounded by *Leptadenia pyrotechnica* fences oriented parallel to the prevailing winds showed that the fences reduced wind flow by more than 98% over a distance 10 times its height. Plants that have deep rooting systems remain upright when winds are violent, and

rainfall is heavy [145]. Moreover, the stratification of plant cover slows down rainfall velocity [146] and wind speed [134].

Overall, the characteristics of plant species that should be targeted to control water and wind erosion are (i) a vast canopy that can cover large areas above ground, (ii) an abundant production of litter that can cover the soil surface, (iii) a deep rooting system and an abundant root biomass with high length and branching intensity, and (iv) the presence of different vegetation strata.

A.4.8 Limitations to the use of plants to help restore degraded tropical soils

Although our review demonstrates that plants can be helpful in many ways, their use to restore degraded soils in tropical environments through the five mechanisms identified also has limitations. Nitrogen fixation by plants is influenced by environmental conditions such as pH, humidity, temperature, or metal toxicity; the latter affects the plant physiologically, slows down the functioning of microbial communities, and limits the rate of N fixation [147,148]. The quantities of N fixed vary considerably from one species to another, as bacterial strains influence symbiotic activity [149,150]. Environmental conditions such as soil type, level of degradation, texture, mineralogy, water availability, acidity, and microbial community also affect C sequestration and root biomass production [9,151]. In this context, species selection is easier when we know most of the conditions listed above. Soil organic matter is an assemblage of living or dead organic constituents of plant, animal, or microbial origin, whether transformed or not, found in the soil [151,152]. It is therefore difficult to know exactly how much organic matter added from plant biomass contributes to increase soil fertility. The proportion of the organic matter added that will remain in the soil is also

conditioned by similar factors to those influencing C sequestration. In many parts of Africa, several studies show that maize consumes a lot of water [153,154]. The advantages and disadvantages of growing this plant should be known to enable it to meet users' objectives. The characteristics of the roots, leaves or foliage, and trunks of plant species differ from one species to another and are most likely unknown for many species of the tropics. Identifying plant species combining several of the desired characteristics provides better chances of restoring degraded tropical soils [155,156]. The effectiveness of plant species in stabilizing soil structure and aggregates also depends on environmental conditions such as soil moisture, temperature, rainfall, and nutrient availability [157]. These same environmental conditions influence the various living organisms in the soil that help to establish a stable soil structure. Finally, although Eucalyptus contributes to the formation of stable aggregates and the restoration of degraded tropical soils [90], this plant is no longer recommended in reforestation programs as it has extremely deep roots and consumes a lot of water, which deprives the other plants around it [158,160].

A.5. Conclusion

This work identified and described five major mechanisms by which plant species can help restore degraded tropical soils and highlighted the desired characteristics of these species. These mechanisms are (1) nitrogen fixation, (2) carbon sequestration, (3) organic matter addition, (4) structure stabilization, and (5) water and wind erosion control. The characteristics to be targeted when choosing appropriate plant species can be separated into two categories, those associated with aboveground parts on the one hand, and root parts on the other. Aboveground characteristics include the ability to

grow tall, have a large leaf area to form a vast canopy, have an abundant leaf, fruit, flower, and branch production to accumulate litter on the soil, and have a high rate of decomposition of plant residues. Belowground characteristics include high root length, roots with a large diameter and high mass density, high rooting depth, and the ability to form symbiotic associations with mycorrhizal fungi and nitrogen-fixing bacteria. Plant species to be targeted for the restoration of degraded tropical soils must possess at least one or two aerial or root characteristics favorable to at least two or three of the five mechanisms identified in this work. The cultivation of plant species has a triple benefit for degraded soils, as not only do they protect them against erosion and solar radiation, but they also contribute significantly to increase their level of fertility and structural stability. Legumes such as Acacia, as well as other plant species such as sugarcane (*Saccharum officinarum*), sorghum (*Sorghum bicolor* L.), Jatropha (*Jatropha curcas* L.), and cacao (*Theobroma cacao*), are plants to target for the restoration of degraded tropical soils because they possess favorable characteristics for promoting soil carbon sequestration and structure stability through increased biomass production and a reduction in water and wind erosion. The results of our research review can be helpful to guide researchers, farmers, and peasants on the mechanisms to target species characteristics to be selected for efficiently restoring degraded tropical soils. Future research should aim at characterizing aboveground and root characteristics of species of interest, as well as their impact on soil restoration mechanisms, from a quantitative point of view. This would greatly increase our mechanistic understanding of how plants can help restore degraded soils.

5. Author Contributions

Conceptualization, R.M.P.; methodology, R.M.P.; software, R.M.P.; validation, V.P. and T.E.E.; formal analysis, R.M.P.; investigation, R.M.P.; resources, V.P.; data curation, R.M.P.; writing-original draft preparation, R.M.P.; writing-review and editing, V.P., P.N.N., and T.E.E.; visualization, R.M.P.; supervision, V.P. and P.N.N. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

A.6. Funding

Our most sincere thanks go to the Programme Canadien des Bourses de la Francophonie (PCBF) for providing us with a grant to R.M.P. (file number 20185529) to finance this work. Please find in these few words all my gratitude.

A.7. Data Availability Statement

“Not applicable” here.

A.8. Conflicts of Interest

“The authors declare no conflict of interest.”

A.9. References

1. Gu, D.; Andreev, K.; Dupre, M.E. Major trends in population growth around the world. *China CDC Wkly.* **2021**, *3*, 604. <https://doi.org/10.46234/ccdcw2021.160>.

2. Ritchie, H. Less meat is nearly always better than sustainable meat, to reduce your carbon footprint. *Our World in Data*, 4 February 2020. Available online: <https://ourworldindata.org/less-meat-or-sustainable-meat#article-citation> (accessed on 27 Novembre 2023).
3. Oberle, B.; Bringezu, S.; Hatfield-Dodds, S.; Hellweg, S.; Schandl, H.; Clement, J. *Global Resources Outlook*; International Resource Panel, United Nations Envio: Paris, France, 2019.
4. Girgenti, V.; Peano, C.; Baudino, C.; Tecco, N. From “farm to fork” strawberry system: Current realities and potential innovative scenarios from life cycle assessment of non-renewable energy use and greenhouse gas emissions. *Sci. Total Environ.* **2014**, *473*, 48–53. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.133>.
5. Sarandón, S.; Flores, C. L’agroécologie: Un nouveau paradigme pour l’élaboration du développement rural durable. In *L’Agroécologie en Argentine et en France. Regards croisés*; L’Harmattan: Paris, France, 2012; pp. 91–120.
6. Baret, P.; Stassart, P.M.; Vanloqueren, G.; Van Damme, J. Dépasser les verrouillages de régimes socio-techniques des systèmes alimentaires pour construire une transition agroécologique. In *Actes du Premier Congrès Interdisciplinaire sur le Développement Durable : Quelle transition pour nos sociétés? Thème 2 : Alimentation, agriculture, élevage*; Université Catholique de Louvain, Namur, 2013; pp. 5-14.
7. Kopittke, P.M.; Menzies, N.W.; Wang, P.; McKenna, B.A.; Lombi, E. Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environ. Int.* **2019**, *132*, 105078. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>.
8. Moebius-Clune, B.; Van Es, H.; Idowu, O.; Schindelbeck, R.; Kimetu, J.; Ngoze, S.; Lehmann, J.; Kinyangi, J. Long-term soil quality degradation along a cultivation chronosequence in western Kenya. *Agric. Ecosys Environ.* **2011**, *141*, 86–99. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.02.018>.

9. Lal, R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability* **2015**, *7*, 5875–5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>.
10. Bachir, A.S.; Hafner, H.; Tourenq, J.N.; Doumandji, S. Structure de l'habitat et biologie de reproduction du Héron garde-bœuf, *Bubulcus ibis*, dans une colonie de la vallée de la Soummam (Petite Kabylie, Algérie). *Rev. Ecol. Terre et Vie* **2000**, *55*, 33–43.
11. Sheng, D.; Fredlund, D.G.; Gens, A. A new modelling approach for unsaturated soils using independent stress variables. *Can. Geotech. J.* **2008**, *45*, 511–534. <https://doi.org/10.1139/t07-112>.
12. Cannavacciolo, M.; Cassagne, N.; Riou, V.; Mulliez, P.; Prévost-Bouré, N.C.; Dequiedt, S.; Villenave, C.; Cérémonie, H.; Cluzeau, D.; Cylly, D. Validation d'un tableau de bord d'indicateurs sur un réseau national de fermes en grande culture et en viticulture pour diagnostiquer la qualité biologique des sols agricoles. *Innov. Agron.* **2017**, *55*, 41–54. <https://doi.org/10.15454/1.5137753402510786E12>.
13. Tóth, B.; Weynants, M.; Nemes, A.; Makó, A.; Bilas, G.; Tóth, G. New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. *Eur. J. Soil Sci.* **2015**, *66*, 226–238. <https://doi.org/10.1111/ejss.12192>.
14. Tecon, R.; Or, D. Biophysical processes supporting the diversity of microbial life in soil. *FEMS Microbiol. Rev.* **2017**, *41*, 599–623. <https://doi.org/10.1093/femsre/fux039>.
15. Lehman, R.M.; Acosta-Martinez, V.; Buyer, J.S.; Cambardella, C.A.; Collins, H.P.; Ducey, T.F.; Halvorson, J.J.; Jin, V.L.; Johnson, J.M.F.; Kremer, R.J.; et al. Soil biology for resilient, healthy soil. *J. Soil Water Conserv.* **2015**, *70*, 12A–18A. <https://doi.org/10.2489/jswc.70.1.12a>.
16. Calvaruso, C.; Blanchart, A.; Bertin, S.; Grand, C.; Pierart, A.; Eglin, T. Quels paramètres du sol mesurer pour évaluer les fonctions et les services écosystémiques associés? *Étud. Gest. Sols* **2021**, *28*, 3–29.

17. Lal, R. Restorative effects of *Mucuna utilis* on soil organic C pool of a severely degraded Alfisol in western Nigeria. In *Global Climate Change and Tropical Ecosystems*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2019; pp. 147–156.
18. Abrahams, P.W. Soils: Their implications to human health. *Sci. Total Environ.* **2002**, *291*, 1–32. [https://doi.org/10.1016/s00489697\(01\)01102-0](https://doi.org/10.1016/s00489697(01)01102-0).
19. Drake, T.W.; Podgorski, D.C.; Dinga, B.; Chanton, J.P.; Six, J.; Spencer, R.G. Land-use controls on carbon biogeochemistry in lowland streams of the Congo Basin. *Glob. Chang. Biol.* **2020**, *26*, 1374–1389. <https://doi.org/10.1111/gcb.14889>.
20. Mama, A.; Sinsin, B.; De Cannière, C.; Bogaert, J. Anthropisation et dynamique des paysages en zone soudanienne au nord du Bénin. *Tropicultura* **2013**, *31*, 78–88.
21. Lal, R. Soil degradation as a reason for inadequate human nutrition. *Food Secur.* **2009**, *1*, 45–57. <https://doi.org/10.1007/s12571009-0009-z>.
22. Lahmar, R.; Ruellan, A. Dégradation des sols et stratégies coopératives en Méditerranée: La pression sur les ressources naturelles et les stratégies de développement durable. *Cah. Agric.* **2007**, *16*, 318–323. <https://doi.org/10.1684/agr.2007.0119>.
23. Schulte, R.P.; Bampa, F.; Bardy, M.; Coyle, C.; Creamer, R.E.; Fealy, R.; Gardi, C.; Ghaley, B.B.; Jordan, P.; O'Donoghue, C.; et al. Making the most of our land: Managing soil functions from local to continental scale. *Front. Environ. Sci.* **2015**, *3*, 81. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2015.00081>.
24. Krupenikov, I.A.; Boincean, B.P.; Dent, D. Humus–Guardian of Fertility and Global Carbon Sink. In *The Black Earth*; Springer: Dordrecht, Netherlands, 2011; pp. 39–50.

25. Frossard, P.-A.; Évette, A. Le génie végétal pour la lutte contre l'érosion en rivière: Une tradition millénaire en constante évolution. *Sci Eaux. Territ. (Spécial Ingénieries-EAT)*. **2009**, *29*, 99–109.
26. Aïdoud, A.; Le Floc'h, É.; Le Houérou, H.N. Les steppes arides du nord de l'Afrique. *Sci. Chang. Planét/Sécher*. **2006**, *17*, 19–30.
27. Graham, P.H.; Vance, C.P. Legumes: Importance and constraints to greater use. *Plant Physiol*. **2003**, *131*, 872–877. <https://doi.org/10.1104/pp.017004>.
28. Karlen, D.L.; Mausbach, M.; Doran, J.W.; Cline, R.; Harris, R.; Schuman, G. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Sci. Soc. Am. J.* **1997**, *61*, 4–10. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>.
29. Dabre, A.; Hien, E.; Some, D.; Drevon, J.J. Effets d'amendements organiques et phosphatés sous zaï sur les propriétés chimiques et biologiques du sol et la qualité de la matière organique en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* **2017**, *11*, 473–487. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v11i1.38>.
30. Bennett, T. *Culture: A Reformer's Science*; Sage Publications Ltd.: Thousand Oaks, CA, USA, 1998.
31. Futughe, A.E.; Purchase, D.; Jones, H. Phytoremediation using native plants. In *Phytoremediation: In-Situ Applications*; Springer: Cham, Switzerland, 2020; pp. 285–327.
32. Lee, J.; Kaunda, R.B.; Sinkala, T.; Workman, C.F.; Bazilian, M.D.; Clough, G. Phytoremediation and phytoextraction in SubSaharan Africa: Addressing economic and social challenges. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **2021**, *226*, 112864. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112864>.

33. Colombet, I. Revue systématique et méta-analyse en médecine palliative. *Médecine Palliat. Soins De Support-AccompagnementEthique* **2015**, *14*, 240–253. <https://doi.org/10.1016/j.medpal.2015.04.001>.
34. Maison, P. La méta-analyse sur données résumées. *Rech. En Soins Infirm.* **2010**, *101*, 18–24. <https://doi.org/10.3917/rsi.101.0018>
35. Beaucher, V.; Jutras, F. Étude comparative de la métasynthèse et de la méta-analyse qualitative. *Rech. Qual.* **2007**, *27*, 58–77. <https://doi.org/10.7202/1086786ar>.
36. Page, M.J.; McKenzie, J.E.; Bossuyt, P.M.; Boutron, I.; Hoffmann, T.C.; Mulrow, C.D.; Shamseer, L.; Tetzlaff, J.M.; Akl, E.A.; Brennan, S.E.; et al. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *Intern. J. Surg.* **2021**, *88*, 105906. <https://doi.org/10.1016/j.ijisu.2021.105906>.
37. Michéli, E.; Fuchs, M.; Hegymegi, P.; Stefanovits, P. Classification of the major soils of Hungary and their correlation with the World Reference Base for Soil Resources (WRB). *Agrokémia És Talajt.* **2006**, *55*, 19–28.
38. Cavalli, J.P.; Reichert, J.M.; Rodrigues, M.F.; de Araújo, E.F. Composition and functional soil properties of Arenosols and Acrisols: Effects on eucalyptus growth and productivity. *Soil Tillage Res.* **2020**, *196*, 104439. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104439>.
39. Ilstedt, U.; Nordgren, A.; Malmer, A. Optimum soil water for soil respiration before and after amendment with glucose in humid tropical acrisols and a boreal mor layer. *Soil Biol. Biochem.* **2000**, *32*, 1591–1599. [https://doi.org/10.1016/S00380717\(00\)00073-0](https://doi.org/10.1016/S00380717(00)00073-0).
40. Mwamba, S.; Kaluba, P.; Moualeu-Ngangue, D.; Winter, E.; Chiona, M.; Chishala, B.H.; Munyinda, K.; Stützel, H. Physiological and morphological

- responses of cassava genotypes to fertilization regimes in chromi-haplic acrisols soils. *Agron. J.* **2021**, *11*, 1757. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091757>.
41. IUSS Working Group, W.R.B. *World Reference Base for Soil Resources 2006*, 2nd ed.; World Soil Resources Reports, No. 103; FAO: Rome, Italy, 2006; 145 p.
 42. Cueto, O.G.; Coronel, C.E.I.; Bravo, E.L.; Morfa CA, R.; Suárez, M.H. Modelling in FEM the soil pressures distribution caused by a tyre on a Rhodic Ferralsol soil. *J. Terramech.* **2016**, *63*, 61–67. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2015.09.003>.
 43. Dick, D.P.; Gonçalves, C.N.; Dalmolin, R.S.; Knicker, H.; Klamt, E.; Kögel-Knabner, I.; Simões, M.L.; Martin-Neto, L. Characteristics of soil organic matter of different Brazilian Ferralsols under native vegetation as a function of soil depth. *Geoderma* **2005**, *124*, 319–333. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.05.008>.
 44. Madari, B.E.; Reeves, J.B., III; Machado, P.L.; Guimarães, C.M.; Torres, E.; McCarty, G.W. Mid-and near-infrared spectroscopic assessment of soil compositional parameters and structural indices in two Ferralsols. *Geoderma* **2006**, *136*, 245–259. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.03.026>.
 45. Özcan, H. Fluvisols. In *The Soils of Turkey*; Springer: Cham, Switzerland, 2018; pp. 129–137.
 46. Rodrigo-Comino, J.; Keshavarzi, A.; Senciales-González, J.M. Evaluating soil quality status of fluvisols at the regional scale: A multidisciplinary approach crossing multiple variables. *River Res. Appl.* **2023**, *39*, 1367–1381. <https://doi.org/10.1002/rra.3865>.
 47. Dawoe, E.K.; Quashie-Sam, J.S.; Opong, S.K. Effect of land-use conversion from forest to cocoa agroforest on soil characteristics and quality of a Ferric Lixisol in lowland humid Ghana. *Agrofor. Syst.* **2014**, *88*, 87–99.
 48. Oorts, K.; Vanlauwe, B.; Merckx, R. Cation exchange capacities of soil organic matter fractions in a Ferric Lixisol with different organic matter inputs. *Agric.*

- Ecosyst. Environ.* **2003**, *100*, 161–171. [https://doi.org/10.1016/s0167-8809\(03\)00190-7](https://doi.org/10.1016/s0167-8809(03)00190-7).
49. Ouattara, K.; Ouattara, B.; Assa, A.; Sédogo, P.M. Long-term effect of ploughing, and organic matter input on soil moisture characteristics of a Ferric Lixisol in Burkina Faso. *Soil Tillage Res.* **2006**, *88*, 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.06.003>.
50. Araújo, M.S.; Schaefer, C.E.; Sampaio, E.V. Soil phosphorus fractions from toposequences of semi-arid Latosols and Luvisols in northeastern Brazil. *Geoderma* **2004**, *119*, 309–321. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.07.002>.
51. Dyck, M.F.; Sorenson, P.T.; Lejoly, J.D.; Quideau, S.A. Gray Luvisols are polygenetic. *Can. J. Soil Sci.* **2022**, *103*, 121–133. <https://doi.org/10.1139/cjss-2022-0035>.
52. Walmsley, A.; Azadi, H.; Tomeckova, K.; Sklenicka, P. Contrasting effects of land tenure on degradation of Cambisols and Luvisols: The case of Central Bohemia Region in the Czech Republic. *Land Use Policy* **2020**, *99*, 104956. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104956>.
53. Agegnehu, G.; Nelson, P.N.; Bird, M.I. Crop yield, plant nutrient uptake and soil physicochemical properties under organic soil amendments and nitrogen fertilization on Nitisols. *Soil Tillage Res.* **2016**, *160*, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.02.003>.
54. Cooper, M.; Vidal-Torrado, P.; Chaplot, V. Origin of microaggregates in soils with ferrallic horizons. *Sci. Agric.* **2005**, *62*, 256–263. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162005000300009>.
55. Dorel, M.; Roger-Estrade, J.; Manichon, H.; Delvaux, B. Porosity and soil water properties of Caribbean volcanic ash soils. *Soil Use Manag.* **2000**, *16*, 133–140. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2000.tb00188.x>.

56. Gura, I.; Mnkeni, P.; Du Preez, C.; Barnard, J. Short-term effects of conservation agriculture strategies on the soil quality of a Haplic Plinthosol in Eastern Cape, South Africa. *Soil Tillage Res.* **2022**, *220*, 105378. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105378>.
57. Ikazaki, K.; Nagumo, F.; Simporé, S.; Barro, A. Soil toposequence, productivity, and a simple technique to detect petroplinthites using ground-penetrating radar in the Sudan Savanna. *Soil Sci. Plant Nutr.* **2018**, *64*, 623–631. <https://doi.org/10.1080/00380768.2018.1502604>.
58. Wildemeersch, J.C.; Garba, M.; Sabiou, M.; Sleutel, S.; Cornelis, W. The effect of water and soil conservation (WSC) on the soil chemical, biological, and physical quality of a Plinthosol in Niger. *Land Degrad. Dev.* **2015**, *26*, 773–783.
59. Bhattacharyya, T.; Pal, D.; Deshpande, S. Genesis and transformation of minerals in the formation of red (Alfisols) and black (Inceptisols and Vertisols) soils on Deccan basalt in the Western Ghats, India. *J. Soil Sci.* **1993**, *44*, 159–171. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1993.tb00442.x>.
60. Kurtzman, D.; Baram, S.; Dahan, O. Soil–aquifer phenomena affecting groundwater under vertisols: A review. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2016**, *20*, 1–12.
61. Doamba, S.M.F.; Nacro, H.B.; Sanon, A.; Sedogo, M. Effet des cordons pierreux sur l'activité biologique d'un sol ferrugineux tropical lessivé (Province du Kouritenga au Burkina Faso). *Int. J. Biol. Chem. Sci.* **2011**, *5*, 304–313. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v5i1.68106>.
62. Soulama, S.; Kadeba, A.; Nacoulma, B.M.; Traoré, S.; Bachmann, Y.; Thiombiano, A. Impact des activités anthropiques sur la dynamique de la végétation de la réserve partielle de faune de Pama et de ses périphéries (sud-est du Burkina Faso) dans un contexte de variabilité climatique. *J. Appl. Biosci.* **2015**, *87*, 8047–8064. <https://doi.org/10.4314/jab.v87i1.6>.

63. Diallo, H.; Bamba, I.; Barima, Y.S.S.; Visser, M.; Ballo, A.; Mama, A.; Vranken, I.; Maiga, M.; Bogaert, J. Effets combinés du climat et des pressions anthropiques sur la dynamique évolutive de la végétation d'une zone protégée du Mali (Réserve de Fina, Boucle du Baoulé). *Sci. Chang. Planét/Sécher.* **2011**, *22*, 97–107. <https://doi.org/10.1684/sec.2011.0306>.
64. Coulibaly, N.D.; Kone, M.; Koné, T.; Hilairekouakou, T.; Kouadio, Y.J. Influence des conditions pédo-climatiques sur les composantes du rendement de *Jatropha curcas* L. dans les zones Nord de savane et Sud forestière de la Côte d'Ivoire. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* **2015**, *9*, 2346–2361. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v9i5.8>.
65. Clark, K.H.; Nicholas, K.A. Introducing urban food forestry: A multifunctional approach to increase food security and provide ecosystem services. *Landsc. Ecol.* **2013**, *28*, 1649–1669. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9903-z>.
66. Benabdoun, M.; Gherbi, H.; Djekoun, A.; Bogusz, D.; Franche, C.; Ykhlef, N. Fixation biologique de l'azote: La symbiose actinorhizienne *Casuarina-Frankia*. *Sci. Technol. C Biotechnol.* **2012**, *35*, 15–19.
67. Duponnois, R.; Plenchette, C.; Bâ, A.M. Growth stimulation of seventeen fallow leguminous plants inoculated with *Glomus aggregatum* in Senegal. *Eur. J. Soil Biol.* **2001**, *37*, 181–186. [https://doi.org/10.1016/s1164-5563\(01\)01077-9](https://doi.org/10.1016/s1164-5563(01)01077-9).
68. Hocher, V.; Auguy, F.; Bogusz, D.; Doumas, P.; Franche, C.; Gherbi, H.; Laplaze, L.; Obertello, M.; Svistoonoff, S. Les symbioses actinorhiziennes fixatrices d'azote: Un exemple d'adaptation aux contraintes abiotiques du sol. *Cah. Agric.* **2009**, *18*, 498–505. <https://doi.org/10.1684/agr.2009.0341>.
69. Benbrahim, K.F.; Ismaili, M.; Benbrahim, S.F.; Tribak, A. Land degradation by desertification and deforestation in Morocco. *Sci. Chang. Planét/Sécher.* **2004**, *15*, 307–320.

70. Benbrahim, K.F.; Berrada, H.; El Ghachtouli, N.; Ismaili, M. Les acacias: Des plantes fixatrices d'azote prometteuses pour le développement durable des zones arides et semi-arides [Acacia: Promising Nitrogen fixing trees for sustainable development in arid and semi-arid areas]. *Int. J. Innov. Appl. Studies* **2014**, *8*, 46.
71. Amadji, G.; Aholoukpè, H. Impact du niébé (*Vigna unguiculata*) et de la fumure minérale sur les propriétés chimiques de la terre de barre du Bénin. *Étud. Gest. Sols* **2008**, *15*, 147–160.
72. Bado, B.V. Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéenne et soudanienne du Burkina Faso. Ph.D. Thesis, Université de Laval, Québec, QC, Canada, 2002; 166p.
73. Azontonde, A.; Feller, C.; Ganry, F.; Remy, J.C. La mucuna et la restauration des propriétés d'un sol ferrallitique au Sud du Bénin. Plante de couverture. *Agric. Dev.* **1998**, *18*, 55–62.
74. Dommergues, Y. La fixation d'azote chez les plantes actinorhiziennes et ses applications. *Acta Bot. Gall.* **1996**, *143*, 663–679. <https://doi.org/10.1080/12538078.1996.10515367>.
75. Balesdent, J.; Basile-Doelsch, I.; Chadoeuf, J.; Cornu, S.; Fekiacova, Z.; Fontaine, S.; Guenet, B.; Hatté, C. Renouvellement du carbone profond des sols cultivés: Une estimation par compilation de données isotopiques. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **2016**, *21*, 181–190.
76. Balesdent, J.; Derrien, D.; Fontaine, S.; Kirman, S.; Klumpp, K.; Loiseau, P.; Marol, C.; Nguyen, C.; Péan, M.; Personeni, E.; et al. Contribution de la rhizodéposition aux matières organiques du sol, quelques implications pour la modélisation de la dynamique du carbone. *Étud. Gest. Sols* **2011**, *18*, 201–216.
77. Jones, D.L.; Nguyen, C.; Finlay, R.D. Carbon flow in the rhizosphere: Carbon trading at the soil–root interface. *Plant Soil* **2009**, *321*, 5–33. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9925-0>.

78. Lal, R. Carbon sequestration. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **2008**, *363*, 815–830. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2185>.
79. Lal, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* **2004**, *123*, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>.
80. Lützow, M.V.; Kögel-Knabner, I.; Ekschmitt, K.; Matzner, E.; Guggenberger, G.; Marschner, B.; Flessa, H. Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions—a review. *Eur. J. Soil Sci.* **2006**, *57*, 426–445. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x>.
81. Lal, R. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. *Environ. Pollut.* **2002**, *116*, 353–362. [https://doi.org/10.1016/s02697491\(01\)00211-1](https://doi.org/10.1016/s02697491(01)00211-1).
82. Johnson, N.C.; Hoeksema, J.D.; Bever, J.D.; Chaudhary, V.B.; Gehring, C.; Klironomos, J.; Koide, R.T.; Michael Miller, R.; Moore, J.; Moutoglis, P.; et al. From Lilliput to Brobdingnag: Extending models of mycorrhizal function across scales. *Bioscience* **2006**, *56*, 889–900. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2006\)56\[889:FLTBEM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2006)56[889:FLTBEM]2.0.CO;2).
83. Lal, R.; Bruce, J. The potential of world cropland soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect. *Environ. Sci. Policy* **1999**, *2*, 177–185. [https://doi.org/10.1016/s1462-9011\(99\)00012-x](https://doi.org/10.1016/s1462-9011(99)00012-x).
84. Cotrufo, M.F.; Wallenstein, M.D.; Boot, C.M.; Denef, K.; Paul, E. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Glob. Chang. Biol.* **2013**, *19*, 988–995. <https://doi.org/10.1111/gcb.12113>.
85. Campbell, C.; De Jong, R. Root-to-straw ratios-influence of moisture and rate of N fertilizer. *Can. J. Soil Sci.* **2001**, *81*, 39–43. <https://doi.org/10.4141/s00-027>.

86. Poorter, H.; Jagodzinski, A.M.; Ruiz-Peinado, R.; Kuyah, S.; Luo, Y.; Oleksyn, J.; Usoltsev, V.A.; Buckley, T.N.; Reich, P.B.; Sack, L. How does biomass distribution change with size and differ among species? An analysis for 1200 plant species from five continents. *New Phytol.* **2015**, *208*, 736–749.
87. Alvarez, R.; Diaz, R.A.; Barbero, N.; Santanatoglia, O.J.; Blotta, L. Soil organic carbon, microbial biomass, and CO₂-C production from three tillage systems. *Soil Tillage Res.* **1995**, *33*, 17–28. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(94\)00432-e](https://doi.org/10.1016/0167-1987(94)00432-e).
88. Poirier, V.; Roumet, C.; Angers, D.A.; Munson, A.D. Species, and root traits impact macroaggregation in the rhizospheric soil of a Mediterranean common garden experiment. *Plant Soil* **2018**, *424*, 289–302. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3407-6>.
89. Derrien, D.; Dignac, M.; Basile-Doelsch, I.; Barot, S.; Cécillon, L.; Chenu, C.; Chevallier, T.; Freschet, G.T.; Garnier, P.; Guenet, B.; et al. Stocker du C dans les sols: Quels mécanismes, quelles pratiques agricoles, quels indicateurs? *Étud. Gest. Sols* **2016**, *23*, 193–224.
90. Kang, B.; Caveness, F.; Tian, G.; Kolawole, G. Longterm alley cropping with four hedgerow species on an Alfisol in southwestern Nigeria—effect on crop performance, soil chemical properties and nematode population. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* **1999**, *54*, 145–155.
91. Crow, S.E.; Reeves, M.; Turn, S.; Taniguchi, S.; Schubert, O.S.; Koch, N. Carbon balance implications of land use change from pasture to managed eucalyptus forest in Hawaii. *Carbon Manag.* **2016**, *7*, 171–181. <https://doi.org/10.1080/17583004.2016.1213140>.
92. Razakamanarivo, R.H.; Razafindrakoto, M.A.; Albrecht, A. Fonction puits de carbone des taillis d'eucalyptus à Madagascar. *Bois Forêts Trop.* **2010**, *305*, 5–19.

93. Alegre, J.; Rao, M. Soil and water conservation by contour hedging in the humid tropics of Peru. *Agric. Ecosyst. Environ.* **1996**, *57*, 17–25. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(95\)01012-2](https://doi.org/10.1016/0167-8809(95)01012-2).
94. Razafimbelo, T.; Barthes, B.; De Luca, E.; Larré-Larrouy, M.-C.; Laurent, J.; Cerri, C.; Feller, C. Effet du paillis des résidus de canne à sucre sur la séquestration de carbone dans un sol ferrallitique argileux du Bresil. *Étud. Gest. Sols* **2003**, *10*, 191–200.
95. Graham, M.; Haynes, R.; Meyer, J. Soil organic matter content and quality: Effects of fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. *Soil Biol. Biochem.* **2002**, *34*, 93–102. [https://doi.org/10.1016/s00380717\(01\)00160-2](https://doi.org/10.1016/s00380717(01)00160-2).
96. Wani, S.P.; Chander, G.; Sahrawat, K.L.; Rao, C.S.; Raghvendra, G.; Susanna, P.; Pavani, M. Carbon sequestration and land rehabilitation through *Jatropha curcas* (L.) plantation in degraded lands. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2012**, *161*, 112–120. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.07.028>.
97. Diédhiou, I.; Diallo, D.; Mbengue, A.; Hernandez, R.; Bayala, R.; Diémé, R.; Diédhiou, P.M.; Sène, A. Allometric equations and carbon stocks in tree biomass of *Jatropha curcas* L. in Senegal's Peanut Basin. *Glob. Ecol. Conserv.* **2017**, *9*, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2016.11.007>.
98. Recous, S.; Lashermes, G.; Bertrand, I. Couplages et contrôles des cycles du carbone et de l'azote par les communautés microbiennes dans les sols cultivés. In *Les sols et la vie souterraine: Des enjeux majeurs en agroécologie*; Briat, J.-F., Job, D., Eds.; Éditions Quae: Versailles, France, 2017; pp. 43–62.
99. Janssen, B.H.; Guiking, F.; van der Eijk, D.; Smaling, E.M.; Wolf, J.; van Reuler, H. A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma* **1990**, *46*, 299–318. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(90\)90021-z](https://doi.org/10.1016/0016-7061(90)90021-z).

100. Bonneau, M. Evolution of the mineral fertility of an acidic soil during a period of ten years in the Vosges mountains (France). Impact of humus mineralisation. *Ann. For. Sci.* **2005**, *62*, 253–260. <https://doi.org/10.1051/forest:2005017>.
101. Yan, J.; Wang, L.; Hu, Y.; Tsang, Y.F.; Zhang, Y.; Wu, J.; Fu, X.; Sun, Y. Plant litter composition selects different soil microbial structures and in turn drives different litter decomposition pattern and soil carbon sequestration capability. *Geoderma* **2018**, *319*, 194–203. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.01.009>.
102. Ouattara, B.; Coulibaly, K.; Kohio, E.; Doumbia, S.; Ouédraogo, S.; Nacro, H.B. Effets du Système de Culture sous couverture Végétale (SCV) sur les flux hydriques d'un sol ferrugineux à l'Ouest du Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* **2018**, *12*, 1770–1783. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v12i4.20>.
103. Njoukam, R.; Oliver, R.; Peltier, R. Restitution minérale au sol par la litière dans les plantations de *Pinus kesiya* Royle ex-Gordon dans l'ouest du Cameroun. *Ann. For. Sci.* **1999**, *56*, 431–439. <https://doi.org/10.1051/forest:19990507>.
104. Cardoso, I.M.; Kuyper, T.W. Mycorrhizas and tropical soil fertility. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2006**, *116*, 72–84. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.03.011>.
105. Altieri, M.A. Agroecology: The science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2002**, *93*, 1–24. [https://doi.org/10.1016/s0167-8809\(02\)00085-3](https://doi.org/10.1016/s0167-8809(02)00085-3).
106. Ewel, J.J. Natural systems as models for the design of sustainable systems of land use. *Agrofor. Syst.* **1999**, *45*, 1–21.
107. Roose, É. Évolution historique des stratégies de lutte antiérosive. Vers la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Sci. Chang. Planét/Sécher.* **2004**, *15*, 9–18.
108. Hugron, S.; Bussièrès, J.; Rochefort, L. *Plantations d'essences forestières dans le contexte de la restauration écologique des tourbières: Un guide pratique*; Groupe

- de recherche en écologie des tourbières, Université Laval: Québec, QC, Canada, 2011; 88 p.
109. Seigler, D.S. Phytochemistry of Acacia—Sensu lato. *Biochem. Syst. Ecol.* **2003** *31*, 845–873. [https://doi.org/10.1016/S03051978\(03\)00082-6](https://doi.org/10.1016/S03051978(03)00082-6).
 110. Araujo, J.H.R. Rôle de la diversité des vers de terre dans le fonctionnement des sols: Application à l'ingénierie pédologique. Ph.D. Thesis, Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne-Paris 12, Créteil, France, 2022; 175p.
 111. Bardgett, R.D.; Mommer, L.; De Vries, F.T. Going underground: Root traits as drivers of ecosystem processes. *Trends Ecol. Evol.* **2014**, *29*, 692–699. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.10.006>.
 112. Six, J.; Bossuyt, H.; Degryze, S.; Deneff, K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res.* **2004**, *79*, 7–31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>.
 113. Poirier, V.; Angers, D.A.; Whalen, J.K. Formation of millimetric-scale aggregates and associated retention of ¹³C–¹⁵N-labelled residues are greater in subsoil than topsoil. *Soil Biol. Biochem.* **2014**, *75*, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.03.020>.
 114. Martens, D.A. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biol. Biochem.* **2000**, *32*, 361–369. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00162-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00162-5).
 115. Annabi, M.; Haithem, B. Influence des racines sur la stabilité structurale d'un sol du Nord de la Tunisie. *Étud. Gest. Sols* **2011**, *18* 63-74.
 116. Gyssels, G.; Poesen, J.; Bochet, E.; Li, Y. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review. *Prog. Phys. Geogr.* **2005**, *29*, 189–217. <https://doi.org/10.1191/0309133305pp443ra>.

117. Abiven, S.; Menasseri, S.; Chenu, C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability—A literature analysis. *Soil Biol. Biochem.* **2009**, *41*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.09.015>.
118. Rillig, M.C.; Mummey, D.L. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytol.* **2006**, *171*, 41–53. <https://doi.org/10.1111/j.14698137.2006.01750.x>.
119. Nguyen, C. Rhizodeposition of organic C by plant: Mechanisms and controls. In *Sustainable Agriculture*; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2009; pp. 97–123.
120. Gould, I.J.; Quinton, J.N.; Weigelt, A.; De Deyn, G.B.; Bardgett, R.D. Plant diversity and root traits benefit physical properties key to soil function in grasslands. *Ecol. Lett.* **2016**, *19*, 1140–1149.
121. Bodner, G.; Leitner, D.; Kaul, H.-P. Coarse and fine rooted plant species have distinct effect on soil pore size distribution. *Plant Soil* **2014**, *380*, 133–151.
122. Kraus, T.E.; Dahlgren, R.A.; Zasoski, R.J. Tannins in nutrient dynamics of forest ecosystems—a review. *Plant Soil* **2003**, *256*, 41–66.
123. Bearden, B.N. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on soil structure and soil water characteristics of vertisols. *Plant Soil* **2001**, *229*, 245–258.
124. Bearden, B.N.; Petersen, L. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on soil structure and aggregate stability of a vertisol. *Plant Soil* **2000**, *218*, 173–183.
125. Haynes, R.; Beare, M. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biol. Biochem.* **1997**, *29*, 1647–1653. [https://doi.org/10.1016/s0038-0717\(97\)00078-3](https://doi.org/10.1016/s0038-0717(97)00078-3).
126. Erktan, A.; Cécillon, L.; Graf, F.; Roumet, C.; Legout, C.; Rey, F. Increase in soil aggregate stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems: Combined effects of soil, root traits and plant community characteristics. *Plant Soil* **2016**, *398*, 121–137.

127. Newsham, K.; Fitter, A.; Watkinson, A. Multi-functionality and biodiversity in arbuscular mycorrhizas. *Trends Ecol. Evol.* **1995**, *10*, 407–411. [https://doi.org/10.1016/s0169-5347\(00\)89157-0](https://doi.org/10.1016/s0169-5347(00)89157-0).
128. Degens, B.; Sparling, G.; Abbott, L. Increasing the length of hyphae in a sandy soil increases the amount of water-stable aggregates. *Appl. Soil Ecol.* **1996**, *3*, 149–159. [https://doi.org/10.1016/0929-1393\(95\)00074-7](https://doi.org/10.1016/0929-1393(95)00074-7).
129. Ogunwole, J.; Chaudhary, D.; Ghosh, A.; Daudu, C.; Chikara, J.; Patolia, J. Contribution of *Jatropha curcas* to soil quality improvement in a degraded Indian entisol. *Acta Agric. Scand. Sect. B* **2008**, *58*, 245–251. <https://doi.org/10.1080/09064710701628925>.
130. Rey, F.; Ballais, J.-L.; Marre, A.; Rovéra, G. Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *Comptes Rendus Geosci.* **2004**, *336*, 991–998. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2004.03.012>.
131. Sidle, R.C.; Ziegler, A.D.; Negishi, J.N.; Nik, A.R.; Siew, R.; Turkelboom, F. Erosion processes in steep terrain—Truths, myths, and uncertainties related to forest management in Southeast Asia. *For. Ecol. Manag.* **2006**, *224*, 199–225.
132. Wondzell, S.M.; King, J.G. Postfire erosional processes in the Pacific Northwest and Rocky Mountain regions. *For. Ecol. Manag.* **2003**, *178*, 75–87. [https://doi.org/10.1016/s0378-1127\(03\)00054-9](https://doi.org/10.1016/s0378-1127(03)00054-9).
133. Vennetier, M.; Ladier, J.; Rey, F. Le contrôle de l'érosion des sols forestiers par la végétation face aux changements globaux. *Rev. For. Française* **2014**, *4*, 517–530. <https://doi.org/10.4267/2042/56564>.
134. Lamers, J.; Feil, P. Farmers' knowledge and management of spatial soil and crop growth variability in Niger, West Africa. *Neth. J. Agric. Sci.* **1995**, *43*, 375–389.
135. Cam, C.; Froger, D.; Moulin, J.; Rassineux, J.; Servant, J. Representation cartographique de la sensibilité des sols à l'infiltration hydrique verticale. *Étud. Gest. Sols* **1996**, *3*, 97–112.

136. Mazour, M.; Roose, E. Influence de la couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des sols sur parcelles d'érosion dans les bassins versants du Nord-ouest de l'Algérie. *Bull. Réseau Erosion* **2002**, *21*, 320–330.
137. Morsli, B.; Mazour, M.; Mededjel, N.; Hamoudi, A.; Roose, E. Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et d'érosion sur les versants semi-arides du nord-ouest de l'Algérie. *Sci. Chang. Planét/Sécher.* **2004**, *15*, 96–104.
138. Berkane, A.; Yahiaou, A. L'érosion dans les Aurès. *Sci. Chang. Planét/Sécher.* **2007**, *18*, 213–216.
139. Douzet, J.-M.; Scopel, E.; Muller, B.; Rakotoarisoa, J.; Albrecht, A.; Razafindramanana, N. Effets des systèmes de cultures en semis direct avec couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des cultures pluviales des Hautes Terres de Madagascar. *Étud. Gest. Sols* **2010**, *17*, 131–142.
140. Garg, K.K.; Karlberg, L.; Wani, S.P.; Berndes, G. Jatropha production on wastelands in India: Opportunities and trade-offs for soil and water management at the watershed scale. *Biofuels Bioprod. Biorefining* **2011**, *5*, 410–430. <https://doi.org/10.1002/bbb.312>.
141. Ouattara, V.T.; Konate, Z.; Messoum, G.F.; Kassin, E.K.; Tahy, M.G.; Koko, L.A.; Kone, B.; Dick, B.A.; et Camara, M. Effets de la fertilisation organo-phosphatée sur la fertilité en matière organique et complexe adsorbant d'un ferralsol sous cacaoyers dans la région de Divo (Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.* **2018**, *12*, 2901–2921. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v12i6.33>.
142. Bielders, C.L.; Michels, K.; Rajot, J.-L. On-farm evaluation of ridging and residue management practices to reduce wind erosion in Niger. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **2000**, *64*, 1776–1785. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6451776x>.
143. Michels, K.; Sivakumar, M.; Allison, B. Wind erosion control using crop residue I. Effects on soil flux and soil properties. *Field Crops Res.* **1995**, *40*, 101–110. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)00094-s](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)00094-s).

144. Tidjani, A.D.; Ambouta, K.; Bielders, C. Réhabilitation d'une dune vive par fixation mécanique: Flux éoliens, fertilité du sol et biodiversité des herbacées. *Geo-Eco-Trop* **2009**, *33*, 81–98.
145. Danjon, F.; Bert, D.; Godin, C.; Trichet, P. Structural root architecture of 5-year-old *Pinus pinaster* measured by 3D digitising and analysed with AMAPmod. *Plant Soil* **1999**, *217*, 49–63.
146. Mouisat, A.; Harrouni, C.; Chaouki, A.; Douaik, A.; Derradji, A.; Tlemcani, N.-E.B. Efficacité des méthodes du génie biologique pour lutter contre l'érosion hydrique des talus marneux de l'autoroute Fès-Taza. *Rev. Maroc. Sci. Agron. Vét.* **2020**, *8*, 67-77.
147. Emamverdian, A.; Ding, Y.; Mokhberdorani, F.; Xie, Y. Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response. *Sci. World J.* **2015**, *2015*, 756120. <https://doi.org/10.1155/2015/756120>.
148. Kante, M. Rhizodéposition du carbone et de l'azote chez quatre espèces de Fabacées, conséquences sur la structure et l'activité du microbiote du sol. Ph.D. Thesis, Université de Normandie, Caen, France, 2022; 395p.
149. Maj, D.; Wielbo, J.; Marek-Kozaczuk, M.; Skorupska, A. Response to flavonoids as a factor influencing competitiveness and symbiotic activity of *Rhizobium leguminosarum*. *Microbiol. Res.* **2010**, *165*, 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2008.06.002>.
150. Azib, S. La symbiose rhizobium-luzerne: Étude de la diversité rhizobienne et essais d'inoculation en vue d'améliorer les rendements en fourrage dans le Sahara septentrional est-algérien. Ph.D. Thesis, Université Kasdi Merbah Ouargla, Ouargla, Algeria, 2020; 143p.
151. Girard, M.C.; Walter, C.; Rémy, J.C.; Berthelin, J.; Morel, J.L. *Sols et environnement-2e édition - Cours, exercices et études de cas*; Dunod: Malakoff, France 2011.

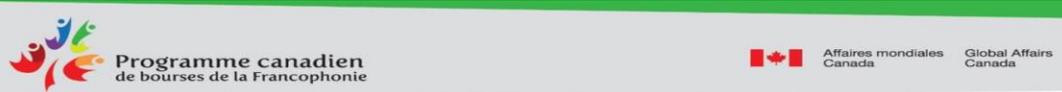
152. Gobat, J.M.; Aragno, M.; Matthey, W. *Le sol vivant: Bases de pédologie, biologie des sols-3e édition*; EPFL Press : Lausanne, Switzerland, 2010;848p..
153. Barrière, Y. Le maïs et l'eau: Une situation aujourd'hui paradoxale, mais des progrès génétiques à attendre d'un idéotype redéfini. *Fourrages* **2001**, *168*, 477–489.
154. Kabongo Tshiabukole, J.P. Evaluation de la sensibilité aux stress hydriques du maïs (*Zea mays* L.) cultivé dans la savane du Sud-Ouest de la RD Congo, cas de Mvuazi. Ph.D. Thesis, Université Pédagogique Nationale, Kinshasa, Democratic Republic of the Congo, 2018; 162p.
155. Reubens, B.; Poesen, J.; Danjon, F.; Geudens, G.; Muys, B. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: A review. *Trees* **2007**, *21*, 385–402. <https://doi.org/10.1007/s00468-0070132-4>.
156. Ntenga, R. Modélisation multi-échelle et caractérisation de l'anisotropie élastique de fibres végétales pour le renforcement de matériaux composites. Ph.D. Thesis, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France and Université de Yaoundé, Yaoundé, Cameroon, 2007; 185p.
157. Razanamalala, K. Priming Effect: Vers un outil de gestion de la fertilité des sols cultivés à Madagascar. Ph.D. Thesis, Université Montpellier SupAgro, Montpellier, France and Université d'Antananarivo, Antananarivo, Madagascar 2017; 212p.
158. Germon, A. Conséquences de la coupe rase sur la production de racines fines, CO₂, CH₄ et N₂O jusqu'à la nappe phréatique dans une plantation d'Eucalyptus grandis menée en taillis sur un dispositif d'exclusion de pluie. *Bois For. Trop.* **2020**, *346*, 79– 80. <https://doi.org/10.19182/bft2020.346.a36293>.
159. Pradier, C. Rôles fonctionnels des racines fines profondes en plantation d'eucalyptus au Brésil sur sols pauvres en nutriments. Réponse à une situation

hydrique limitante. Ph.D. Thesis, Université Montpellier SupAgro, Montpellier, France, 2016; 235p.

160. Chew, M.K. The monsterring of tamarisk: How scientists made a plant into a problem. *J. Hist. Biol.* **2009**, *42*, 231–266. <https://doi.org/10.1007/s10739-009-9181-4>.

ANNEXE B

LETTRE DU PROGRAMME CANADIEN BOURSES DE LA FRANCOPHONIE



ATTESTATION DE BOURSE

A QUI DE DROIT,

Nous attestons par la présente, que **Monsieur Renaud MASSOUKOU PAMBA** né le **17 septembre 1980** est bénéficiaire d'une bourse d'Affaires mondiales Canada dans le cadre du Programme canadien de bourses de la Francophonie (PCBF), pour l'année 2018-19 et est admis pour un programme de **Doctorat en sciences de l'environnement (secteur mines)** à l'**Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)**.

Cette bourse d'une durée maximale de **quarante-huit (48) mois** prend effet à compter de la **session d'hiver 2019** et prendra fin le **31 décembre 2022**, et le boursier devra quitter le Canada au plus tard le **31 janvier 2023**.

Le Consortium composé du Bureau canadien de l'éducation internationale (BCEI) et de l'Entraide universitaire mondiale du Canada (EUMC) administre le programme pour le compte du Ministère.

Il est à noter que les boursier(e)s du PCBF sont exemptés du Certificat d'acceptation du Québec (CAQ) / <http://www.immigration-quebec.gouv.qc.ca/fr/immigrer-installer/etudiants/obtenir-autorisations/conditions-requises/liste-exemptions.html>.

La bourse qui est accordée comporte une allocation de subsistance d'au moins 1 000 \$CAN par mois pour assumer les frais de subsistance. La bourse couvre aussi la totalité des frais de scolarité, d'assurance-santé, l'achat de livres, de matériel informatique/didactique, le transport international au début et à la fin de la formation ainsi que d'autres frais selon les règles en vigueur dans le programme.

Cette attestation est émise pour fins administratives seulement et ne peut prévaloir contre les règles du Programme canadien de bourses de la Francophonie (PCBF).

Fait à Ottawa, le 5 novembre 2018

Tony Toufic

Directeur
Programme canadien de bourses de la Francophonie (PCBF)
t: (613) 237-4820 #3338 f: (613) 237-1073 / ttoufic@cbie.ca

ANNEXE C

LETTRE D'ADMISSION A L'UQAT



445, boulevard de l'Université, Rouyn-Noranda (Québec) J9X 5E4
Tél : 819 762 0971 Téléc. : 819 797 4727

Le 9 octobre 2018

ATTESTATION D'ADMISSION

Nom :	Massoukou Pamba
Prénom :	Rénaud
Pays :	Gabon
Date de naissance :	17 septembre 1980
Session d'admission :	Hiver 2019
Programme :	Doctorat en sciences de l'environnement (secteur mines) (366M)
Directeur de recherche :	Vincent Poirier
Cycle du programme :	Études de 3 ^e cycle
Crédits du programme :	90 crédits
Durée du programme :	4 ans
Année universitaire :	2018-2019

Par la présente, nous attestons que l'étudiant ci-haut mentionné est **admis à temps complet au programme de Doctorat en sciences de l'environnement (secteur mines) (366M)**, à l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue. Dès son arrivée, l'étudiant devra se présenter au Bureau des étudiants étrangers¹ avec les pièces suivantes :

- Certificat d'acceptation du Québec (CAQ)
- Permis d'études
- Relevés de notes officiels
- Originaux de tous les diplômes obtenus

La session Hiver 2019 se tiendra du 7 janvier au 26 avril 2019. Toutefois, l'étudiant peut débuter son programme dans les semaines suivant le début de la session. En 2018-2019, les frais de scolarité à payer s'élèvent à environ 1 489.45 \$² par session pour chacune des six (6) premières sessions. Les frais de scolarité sont de 7 604.71 \$ cependant, une bourse de 6 152.85 \$ s'applique à ces frais. Afin de conserver cette bourse à une session ultérieure, l'étudiant doit maintenir une moyenne cumulative de 3,0 sur 4,3 et respecter un cheminement à temps complet. À cela, s'ajoutent les frais pour l'assurance maladie et hospitalisation au coût de 936 \$³ par année. L'étudiant doit obligatoirement souscrire à l'assurance Desjardins. Les renseignements lui seront fournis à son arrivée au Bureau des étudiants étrangers.

Tous les étudiants étrangers doivent se procurer les autorisations officielles auprès des autorités gouvernementales pour venir étudier au Québec. La première étape est l'obtention du Certificat d'acceptation du Québec (CAQ) <http://www.immigration-quebec.gouv.qc.ca/fr/index.html> par la suite l'obtention du permis d'études auprès des services d'Immigration Canada <http://www.cic.gc.ca/francais/etudier/index.asp>.

Pour toute information supplémentaire, n'hésitez pas à communiquer avec moi au numéro (819) 762-0971 poste 2205. Veuillez recevoir, Madame, Monsieur, l'expression de mes sentiments les meilleurs.

Hélène Boissé
Registraire et directrice des services aux étudiants



ANNEXE D

LETTRÉ DES SUBVENTIONS DE RECHERCHE A LA CRÉATION



Le 22 avril 2021

Monsieur Vincent Poirier
Institut de recherche en mines et en environnement
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Objet : Subventions de recherche et de création – FIRC/FUQAT (2021-2022)
Soutien à la réalisation de projets courts

Monsieur,

Le comité de la recherche et de la création a procédé à l'analyse des demandes de financement soumises au concours de subventions institutionnelles de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.

Le comité est heureux de vous informer qu'une somme de 9 960 \$ vous a été octroyée pour votre demande de « Soutien à la réalisation de projets courts » pour votre projet « Étude du potentiel de la spectroscopie dans le proche infrarouge à prédire certaines propriétés physiques, chimiques et biologiques d'un sol tropical dégradé en voie de restauration ».

Cette année, les demandes au concours de subventions institutionnelles de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue ont totalisé 125 278 \$ et 101 894 \$ a été accordé.

Notez que cette subvention est en vigueur pour la période du 1^{er} mai 2021 au 30 avril 2022. Si des modifications importantes apparaissent en cours de projet, veuillez en aviser votre conseiller à la recherche pour approbation.

Nous vous rappelons que cet octroi devra faire l'objet d'un rapport d'activités à déposer au vice-rectorat à l'enseignement, à la recherche et à la création, au plus tard le 31 mars 2022. Le formulaire à cet effet est disponible sur le site Web de l'UQAT, à l'onglet Recherche. Il est très important d'acheminer ce rapport afin d'assurer un suivi des retombées du projet.

Nous désirons vous offrir toutes nos félicitations pour cet octroi et pour la contribution que vous apportez au rayonnement de l'établissement.

Nous vous invitons à communiquer avec votre conseiller à la recherche pour toute question relative au programme de financement institutionnel.

Veuillez agréer, Monsieur, l'expression de mes sentiments les meilleurs.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Louis Imbeau', with a stylized flourish at the end.

Louis Imbeau, Ph.D.
Doyen à la recherche et à la création

LI/bg

ANNEXE E

LETTRE DE LA FONDATION JA DESÈVE



Rouyn-Noranda, le 22 juin 2023

Monsieur Renaud Massoukou Pamba
Étudiant au doctorat en sciences de l'environnement
Institut de recherche en mines et en environnement
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Objet : Bourses de soutien au dépôt de thèse doctorale – Fondation J.A. DeSève et Fondation de l'UQAT

Monsieur,

Le décanat à la recherche et à la création (DRC) est heureux de vous informer que votre demande de financement soumise aux Bourses de soutien au dépôt de thèse doctorale – Fondation J.A. DeSève et Fondation de l'UQAT a été retenue et qu'un montant total de 7 000\$ vous sera versé pour votre demande.

Un premier montant de 4 000 \$ vous sera versé à l'octroi de la bourse et un deuxième montant de 3 000 \$ vous sera versé lors de la réception au DRC d'une preuve du dépôt initial de votre thèse (transmettre par courriel).

En guise de reconnaissance aux donateurs, nous vous invitons à ajouter le nom de la Fondation J.A. DeSève et la Fondation de l'UQAT dans les remerciements de votre thèse et ainsi que dans les contributions scientifiques qui en découlent.

Instructions pour le dépôt de la bourse :

Pour procéder au premier versement de la bourse, il est important de rédiger un mot de remerciement à votre donateur en complétant [ce lien](#) dans les deux semaines suivant la réception de la présente lettre. Merci d'y inclure les informations suivantes :

- Votre nom et prénom;
- Domaine et programme d'études;
- Le montant de votre bourse;
- Mention du nom du donateur : la Fondation J.A. DeSève
- Quels impacts aura l'obtention de cette bourse dans votre vie?

Vous trouverez également en pièce jointe un formulaire de versement de bourse à compléter, à signer (à signature du boursier), et à nous retourner le plus rapidement possible. Nous vous rappelons que cette bourse ne peut pas être cumulée à une bourse d'excellence ou une bourse obtenue d'autres sources de financement.

Nous désirons vous offrir toutes nos félicitations pour cet octroi et pour la contribution que vous apportez au rayonnement de l'établissement.

Veuillez agréer, Monsieur, l'expression de nos sentiments les meilleurs.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Louis Imbeau', is written over a light blue horizontal line.

Louis Imbeau
Doyen à la recherche et à la création
Vice-rectorat à l'enseignement, à la recherche et à la création

ANNEXE F

PHOTOS DES TRAVAUX DE TERRAIN

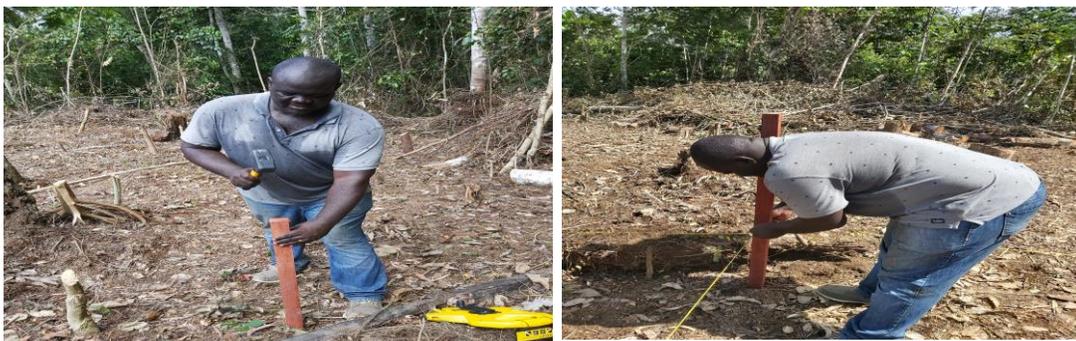


a) Plantation d'hévéas devenue improductive, b) Abattage et tronçonnage des hévéas



c) Nettoyage de la plantation

d) Délimitation des blocs et des parcelles



e et d) Piquetage et délimitation des parcelles élémentaires avant la trouaison



f) Trouaison



g) Trouaison 0-10 cm



h) Trouaison 10-20 cm



i) Collecte des échantillons des sols

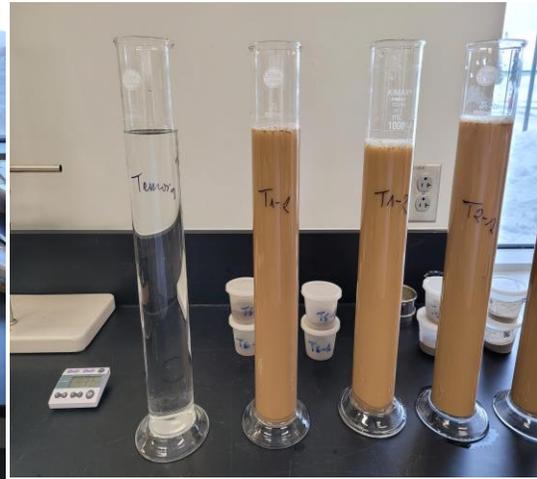
j) Boutures et graines de *Jatropha curcas*

ANNEXE G

PHOTOS DES ACTIVITES AU LABORATOIRE



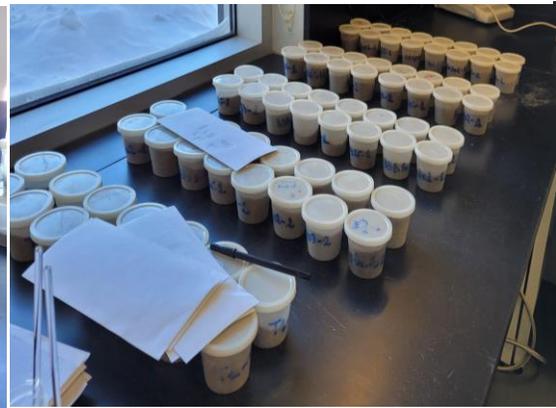
a) Mesure du pH du sol



b) Tube de 1000 ml pour déterminer la texture du sol



c) Béchers de 500 ml



d) Echantillons de sol



e) Tamisage des échantillons de sol à 2 mm

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE

- Achten, W. M., Nielsen, L. R., Aerts, R., Lengkeek, A. G., Kjær, E. D., Trabucco, A., Hansen, J. K., Maes, W. K., Graudal, L et Akinnifesi, F. K. (2010). Towards domestication of *Jatropha curcas*. *Biofuels*, 1(1), 91-107.
- Achten, W. M., Verchot, L., Franken, Y. J., Mathijs, E., Singh, V. P., Aerts, R. et Muys, B. (2008). *Jatropha* bio-diesel production and use. *Biomass and Bioenergy*, 32(12), 1063-1084.
- Adamou, I., Habou, Z. A., Hassimi, M. S., Mamane, S. M. et Adam, T. (2020). Effet des huiles de pourghère (*Jatropha curcas* L.) et de neem (*Azadirachta indica*). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 14(4), 1282-1293.
- Aerts, R. (2008). *Afrocarpus falcatus* (Thunb.) CN Page. *Protabase Record*, 10 pages.
- Afzal, I., Shinwari, Z. K., Sikandar, S. et Shahzad, S. (2019). Plant beneficial endophytic bacteria: Mechanisms, diversity, host range and genetic determinants. *Microbiological Research*, 221, 36-49.
- Ahononga, F., Gouwakinnou, G., Biao, S., Ahouandjinou, O., Biao, S. et Sonounameto, R. (2020). Facteurs d'affectation des terres et effets sur les services écosystémiques et la biodiversité: Synthèse bibliographique. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin Juin*, 30(02), 1-9.
- Ahoton, L., Quenum, F. et Mergeai, G. (2011). Evaluation agromorphologique et sélection des meilleures accessions de Pourghère (*Jatropha curcas* L.)

- introduites au Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 5(4), 1619-1627.
- Aïdoud, A., Le Floc'h, É. et Le Houérou, H. N. (2006). Les steppes arides du nord de l'Afrique. *Science et Changements Planétaires/Sécheresse*, 17(1), 19-30.
- Al-Awadhi, J. M., Misak, R. F. et Omar, S. S. (2003). Causes and consequences of desertification in Kuwait: a case study of land degradation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 62, 107-115.
- Angers, D., Arrouays, D., Saby, N. et Walter, C. (2011). Estimating and mapping the carbon saturation deficit of French agricultural topsoils. *Soil use and Management*, 27, 448-452.
- Angers, D. et Simard, R. (1986). Relations entre la teneur en matière organique et la masse volumique apparente du sol. *Canadian Journal of Soil Science*, 66(4), 743-746.
- Anguessin, B., Mapongmetsem, P. M., Ibrahima, A. et Fawa, G. (2021). Effet de la fertilisation organique à base de litière foliaire de *Jatropha curcas* L. et *Jatropha gossypifolia* L. sur la culture de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) à Guider (Nord/Cameroun). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 15(2), 524-535.
- Antoni, V. et Arrouays, D. (2007). Le stock de carbone dans les sols agricoles diminue. Institut Français de l'Environnement. Numéro 121, Page 1-4.
- Arrouays, D., Jolivet, C., Boulonne, L., Bodineau, G., Ratié, C., Saby, N. et Grolleau, E. (2003). Le réseau de Mesures de la Qualité des Sols de France (RMQS). *Etude et Gestion des Sols*, 10(4), 241-250.
- Atchada, C. C., Zoffoun, A. G., Akplo, T. M., Azontonde, A. H., Tente, A. B. et Djego, J. G. (2018). Modes d'utilisation des terres et stock de carbone organique du

sol dans le bassin supérieur de Magou au Bénin. *International Journal of Biological Chemical Sciences*, 12(6), 2818-2829.

Avakoudjo, J., Kindomihou, V., Akponikpe, P. I., Thiombiano, A. et Sinsin, B. (2013). Essences végétales et techniques de restauration des zones d'érosion (dongas) du Parc W et de sa périphérie à Karimama (Nord-Bénin). *Journal of Applied Biosciences*, 69, 5496-5409.

Bagafou, Y. A. (2013). Status of soil resources, the needs and priorities for its sustainable management in Gabon, Communication personnelle.

Baize, D., Courbe, C., Suc, O., Schwartz, C., Tercé, M., Bispo, A., Sterckman T., et Ciesielski, H. (2006). Épandages de boues d'épuration urbaines sur des terres agricoles: impacts sur la composition en éléments en traces des sols et des grains de blé tendre. *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA*, 53(53), 35-61.

Barbier, J., Cissao, M., Tacourou, B., Cissé, C., Grand, C., Loch, F. et Mergeai, G. (2012). Intérêts de mettre en place une filière courte basée sur la culture du jatropha (*Jatropha curcas* L.) dans la communauté rurale de Dialacoto: Aide au Développement Gembloux. Synthèse bibliographique. 138 pages.

Barro, Samba, Diatta et Akpo. (2013). Effet du travail du sol sur la productivité de différentes provenances de *Jatropha curcas*. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 20(3), 165-170. DOI: 110.1051/ocl.2013.0508.

Battigelli, J. P., Spence, J. R., Langor, D. W. et Berch, S. M. (2004). Short-term impact of forest soil compaction and organic matter removal on soil mesofauna density and oribatid mite diversity. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(5), 1136-1149.

- Baudoin, J., Demol, J., Louant, B., Maréchal, R. et Otoul, E. (2002). Amélioration des plantes. Application aux principales espèces cultivées en régions tropicales. Les presses agronomiques de Gembloux : Gembloux. Belgique. 581 p.
- Bazongo, P., Ouattara, B., Traore, K. et Traore, O. (2021). Effet de *Jatropha curcas* sur les propriétés physiques et chimiques des sols dans la zone sud-soudanienne du Burkina Faso. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 32(1), 35-42.
- Bazongo, P., Traore, K., Traore, O., Bilgo, A., Yelemou, B., Sanon, K. B., Hien, V., Nacro, B. H. (2015). Caractérisation des systèmes de production de *Jatropha* dans les exploitations agricoles de la zone Ouest du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9(5), 2432-2445.
- Behera, S. K., Srivastava, P., Tripathi, R., Singh, J. et Singh, N. (2010). Evaluation of plant performance of *Jatropha curcas* L. under different agro-practices for optimizing biomass—a case study. *Biomass and Bioenergy*, 34(1), 30-41.
- Benbrahim, K. F., Ismaili, M., Benbrahim, S. F. et Tribak, A. (2004). Land degradation by desertification and deforestation in Morocco. *Science et Changements Planétaires/Sécheresse*, 15(4), 307-320.
- Bergeret, P. et Dufumier, M. (2002). Analyser la diversité des exploitations agricoles. In *Mémento de l'agronome*. Ministère des affaires étrangères (CIRAD/GRET) Paris (France); 321-344 p.
- Bizouerne, E. (2021). Contrôle génétique et moléculaire de la qualité germinative chez la tomate: rôle du développement de la graine et influence de la température. Thèse de doctorat de l'Université Agrocampus Ouest (France). 347 pages.
- Block, R., Van Rees, K. et Knight, J. (2006). A review of fine root dynamics in *Populus* plantations. *Agroforestry Systems*, 67, 73-84.

- Bojórquez-Quintal, E., Escalante-Magaña, C., Echevarría-Machado, I. et Martínez-Estévez, M. (2017). Aluminum, a friend or foe of higher plants in acid soils. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1767.
- Boukharaeva, L. et Marloie, M. (2011). Des sols agricoles au service de la résilience urbaine: réflexions à partir du cas de la Russie. *Espaces et Sociétés*, 147(4), 135-153.
- Boyer, J. (1976). L'aluminium échangeable: incidences agronomiques, évaluation et correction de sa toxicité dans les sols tropicaux. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol*, 14(4), 259-269. .
- Brady, N. C. et Weil, R. R. (2002). Soil and the hydrologic cycle. *The Nature and Properties of Soils*, Fifteenth edition. | Columbus : Pearson, 219-271 p.
- Brittaine, R. et Lutaladio, N. (2010). Jatropha: a smallholder bioenergy crop: the potential for pro-poor development. *Integrated Crop Management Vol. 8–2010* 17 p.
- Burkill, H. M. (1994). *The useful plants of west tropical Africa. Volume 2: Families EI*. Royal Botanic Gardens, Kew, Richmond, United Kingdom, Edition 2, 636 pages.
- Burrow, C. (2015). Influence des modalités de restauration de sols dégradés sur leur colonisation par une faune du sol fonctionnelle. Thèse de Doctorat de l'Université de Lille 1, (France) 312 p.
- Butterly, C., Baldock, J. A. et Tang, C. (2013). The contribution of crop residues to changes in soil pH under field conditions. *Plant and Soil*, 366, 185-198.
- Butterly, C. R., Wang, X., Sale, P., Li, G. et Tang, C. (2021). Liming effect of non-legume residues promotes the biological amelioration of soil acidity via nitrate uptake. *Plant and Soil*, 464, 63-73.

- Cai, F., Mei, L., An, X., Gao, S., Tang, L. et Chen, F. (2011). Lipid peroxidation and antioxidant responses during seed germination of *Jatropha curcas*. *International Journal of Agriculture and Biology*, 13(1), 25-30.
- Calvaruso, C., Blanchart, A., Bertin, S., Grand, C., Pierart, A. et Eglin, T. (2020). Quels paramètres du sol mesurer pour évaluer les fonctions et les services écosystémiques associés? *Etude et Gestion des Sols*, 27, 36-376.
- Calvet, R. (2003). Le Sol: Propriétés et Fonctions. Tome 1: Constitution et Structure, Phénomènes aux Interfaces. Editions France Agricole: Dunod; 456 p.
- Casper, B. B. et Jackson, R. B. (1997). Plant competition underground. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 28(1), 545-570.
- Chapelle, J. (2018). Base de référence mondiale pour les ressources en sols 2014. Système international de classification des sols pour nommer les sols et élaborer des légendes de cartes pédologiques. Rapport sur les ressources en sols du monde-N° 106. Mise à jour 2015.
- Chapin III, F. S. (1980). The mineral nutrition of wild plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 11(1), 233-260.
- Chaudhary, D. R., Saxena, J., Lorenz, N., Dick, L. K. et Dick, R. P. (2012). Microbial profiles of rhizosphere and bulk soil microbial communities of biofuel crops switchgrass (*Panicum virgatum* L.) and *Jatropha* (*Jatropha curcas* L.). *Applied and Environmental Soil Science*, 2012.
- Chaussod, R., Breuil, M., Echairi, A., Nouaïm, R., Nowak, V. et Ranjard, L. (1996). La qualité biologique des sols. Évaluation et implications, *Étude et Gestion des Sols*, 3, 261-278.

- Chenu, C., Klumpp, K., Bispo, A., Angers, D., Colnenne, C. et Metay, A. J. I. a. (2014). Stocker du carbone dans les sols agricoles: évaluation de leviers d'action pour la France, *Innovation Agronomique* 37, 23-37.
- Chomel, M., DesRochers, A., Baldy, V., Larchevêque, M. et Gauquelin, T. (2014). Non-additive effects of mixing hybrid poplar and white spruce on aboveground and soil carbon storage in boreal plantations. *Forest Ecology and Management* 328, 292-299.
- Clark, K. H. et Nicholas, K. A. (2013). Introducing urban food forestry: A multifunctional approach to increase food security and provide ecosystem services. *Landscape Ecology*, 28(9), 1649-1669.
- Cluzeau, D., Pérès, G., Guernion, M., Chaussod, R., Cortet, J., Fargette, M., Martin-Laurent F., Martelle, T., Pernin, C., et Ponge, J.-F. (2009). Intégration de la biodiversité des sols dans les réseaux de surveillance de la qualité des sols: exemple du programme pilote à l'échelle régionale, le RMQS BioDiv. *Etude et Gestion des Sols*, 16(3-4), 187-201.
- Collet, C. et Frochot, H. (1992). Effet d'un abri latéral artificiel sur le développement de jeunes merisiers (*Prunus avium* L.) installés en pépinière. *Revue Forestière Française*, 44(S), 85-90.
- Danlos, S. (1994). Essai d'introduction du pourghère (*Jatropha curcas* L.) en milieu villageois : cas de Fougadougou, Mémoire de fin de cycle ingénieur de l' Institut Polytechnique Rural/Institut de Formation et de Recherche Appliquée du Mali. 52 pages
- Datta, M. M., Mukherjee, P., Ghosh, B. et Jha, T. B. (2007). In vitro clonal propagation of biodiesel plant (*Jatropha curcas* L.). *Current Science*, 1438-1442.

- De Barba, D., Rossi, S., Deslauriers, A. et Morin, H. (2016). Effects of soil warming and nitrogen foliar applications on bud burst of black spruce. *Trees*, 30, 87-97.
- De Souza, J., Gbemavo, D., Gnangle, P., Azontonde, A., Adjobo, M. C., Behingan, M. et Kakai, R. G. (2017). Effet du pourghère (*Jatropha curcas* L.) sur la performance agronomique du maïs (*Zea mays* L.) et du manioc (*Manihot esculenta* Crantz) et sur la fertilité du sol au Sud-Bénin. *Annales des Sciences Agronomiques*, 21(2), 223-245.
- Desquilbet, S. (2009). Caractérisation d'accessions Béninoises de *Jatropha curcas* L. : Description des caractéristiques agromorphologiques en vue de la sélection, Mémoire de fin d'études d'ingénieur, ENITA Clermont-Ferrand, France, 82 p
- Diakitè, A. (2018). Extraction et caractérisation des extraits cireux de graines de *Jatropha curcas* pour application biopesticide. Mémoire de Maîtrise ès Sciences. Université Laval, Québec Canada. 76 p.
- Diallo, M. D. (2017). Étude de la sensibilité de trois accessions de *Jatropha Curcas* L. en condition de stress salin. *Sciences de la Vie, de la Terre et Agronomie*, 4(2).
- Dieye, T., Assigbetse, K., Diedhiou, I., Dieng, A. L., Gueye, M. et Masse, D. (2016). The effect of *Jatropha curcas* L. leaf litter decomposition on soil carbon and nitrogen status and bacterial community structure (Senegal). *Journal of Soil Science Environmental Management*, 7(3), 32-44.
- Diop, B., Samba, S. et Akpo, L. E. (2012). Caractéristiques morphologiques et croissance de jeunes plants de *Jatropha curcas* L. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6(2), 677-691.
- Divakara, B., Upadhyaya, H., Wani, S. et Gowda, C. L. (2010). Biology and genetic improvement of *Jatropha curcas* L.: a review. *Applied Energy*, 87(3), 732-742.

- Domergue, M. et Pirot, R. (2008). *Jatropha curcas* L, Rapport de synthèse bibliographique, CIRAD, Avenue d'Agropolis 34398 Montpellier Cedex 5 AGRO génération, 45-47 rue de Monceau 75 008 Paris (France), 111 pages.
- Duchaufour, P., Faivre, P., Poulenard, J., Houot, S. et Gury, M. (2018). Introduction à la science du sol-7e éd.: *Sol, Végétation, Environnement*. Dunod.
- Duranceau, C. (2021). Météo-Média, Fait-il vraiment plus frais à l'ombre qu'au soleil? <https://www.meteomedia.com/fr/nouvelles/art-de-vivre/communaute/fait-il-vraiment-plus-frais-a-lombre-quau-soleil>.
- El Himer, S., Bouabdli, A., Baghdad, B. et Saidi, N. (2013). Perspectives de phytostabilisation par *Jatropha curcas* L. des résidus miniers de la mine de Zaida (Haute Moulouya, Maroc). *Ecologia Mediterranea*, 39(2), 19-30.
- El Mazi, M., Hmamouchi, M. et Houari, A. (2021). Impact de l'évolution de l'utilisation des terres sur la dégradation des ressources en sols dans le Rif Central méridional, Maroc. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 9(4), 567-572.
- Eswaran, H., Lal, R. et Reich, P. (2019). Land degradation: an overview. *Response to Land Degradation*, 20-35.
- Eswaran, H. et Reich, P. (2007). Human impact on land systems of the world. *Soil Survey Horizons*, 48(1), 11-15.
- Farooq, M., Basra, S., Ahmad, N. et Hafeez, K. (2005). Thermal hardening: a new seed vigor enhancement tool in rice. *Journal of Integrative Plant Biology*, 47(2), 187-193.
- Feldmann, P. et Heyt, H. (2002). L'amélioration des plantes et la production de matériel végétal. In *Mémento de l'agronome*. Jouve, Paris (France), 567-582.

- Flanagan, K., Branchu, P. et Gromaire, M.-C. (2017). Les ouvrages de biorétention: synthèse des guides internationaux de conception et de maintenance des filtres plantés pour le traitement à la source des eaux de ruissellement urbaines. *Techniques Sciences Méthodes*, 12, 89-126.
- Fortin, D., Modou, L. et Mayenart. (1997). Plantes médicinales du sahel. Centre d'étude et de coopération internationale. Enda-Editions, 1997. (Dakar, Sénégal) ISBN, 2920114026.
- Francis, G., Edinger, R. et Becker, K. (2005). A concept for simultaneous wasteland reclamation, fuel production, and socio-economic development in degraded areas in India: Need, potential and perspectives of *Jatropha* plantations, *In Natural resources forum*. Vol. 29, No. 1, pp. 12-24.
- Gairola, K., Nautiyal, A. et Dwivedi, A. (2011). Effect of temperatures and germination media on seed germination of *Jatropha curcas* Linn. *Advances in BioResearch*, 2(2), 66-71.
- Gandonou, C. B., Houmba, N., Ahoton, L., Desquilbet, S., Fakambi, K., Datinon, B. et Marshall, E. (2012). Evaluation de la levée et de la croissance chez douze accessions de pourghère (*Jatropha curcas*) au Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin (BRAB)*, 72, 1840-7099.
- Gautry, J., Bourlon, V. et Permingeat, J. (2002). Comparaison du comportement en forêt de plants de Douglas issus de semis et de boutures: résistance à la tempête. In : 3ème rencontre du Groupe de la Sainte-Catherine sur la " Multiplication végétative des ligneux forestiers, fruitiers et ornementaux", Orléans, 22-24 novembre 2000 (pp. 98-111).
- Gbemavo, D. S. J. C., Gnangle, P. C., Azontonde, A. et Glele Kakai, R. L. (2014). Modélisation du stock de biomasse et dynamique de séquestration minérale et

- carbone de *Jatropha curcas* L. sous différent types de sol au Bénin. *Annales des Sciences Agronomiques*, 18(1), 1-20.
- Geiger, R. (1954). "Klassifikation der Klimate nach W. Köppen" Classification des climats d'après W. Köppen. Landolt-Börnstein – Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik, alte Serie . Berlin : Springer. Vol. 3. pp. 603–607.
- Gilles, V. K. (2011). Un quart des sols mondiaux sont très dégradés, selon les Nations Unies. *Le Monde Edition du 8 avril 2011*, 22 p.
- Gimeno-Gilles, C. (2009). Étude cellulaire et moléculaire de la germination chez *Medicago truncatula*. Thèse de doctorat de l'Université d'Angers, Angers (France) 175 pages.
- Gour, V. (2006). Production practices including post-harvest management of *Jatropha curcas*. In : Proceedings of the Biodiesel Conference Towards Energy Independence. Focus of *Jatropha*, Hyderabad, India, June 9-10, pp. 223-251.
- Grime, J. P. (1977). Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. *The American Naturalist*, 111(982), 1169-1194.
- Grimm, C. J. E. E. e. A. (1999). Evaluation of damage to physic nut (*Jatropha curcas*) by true bugs. 92(2), 127-136.
- Gupta, G., Panwar, J. et Jha, P. N. (2013). Natural occurrence of *Pseudomonas aeruginosa*, a dominant cultivable diazotrophic endophytic bacterium colonizing *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br. *Applied Soil Ecology*, 64, 252-261.
- Habou, Z. A., Katkore, B., Abasse, T. et Verheggen, F. J. (2014). Évaluation du potentiel de dix accessions de *Jatropha curcas* L.(Euphorbiaceae) au Niger. *Journal of Applied Biosciences*, 77, 6456-6461.

- Haynes, R. et Beare, M. (1997). Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biology Biochemistry*, 29(11-12), 1647-1653.
- Heller, J. (1996). Physic nut, *Jatropha curcas* L. Bioversity international. Vol. 1, International Plant Genetic Resources Institute (IPGRI), Rome (Italy), pp 66.
- Hendershot, W., Lalonde, H. et Duquette, M. (2006). Chapter 16 – Soil reaction and exchangeable acidity in Carter MR, Gregorich EG (Eds) Soil sampling and methods of analysis, Second edition. CRC Press, Boca Raton, FL, 8 p. .
- Henning, R. K. (2002). Utilisation des savoirs locaux sur le Jatropha. Utilisation de l'huile de *Jatropha curcas* comme matière première et carburant. Notes sur les connaissances autochtones à Bamako (Mali). n°47. Banque Mondiale, 4 p.
- Hinimbio, T. P. (2019). Réhabilitation de la fertilité des sols par usage des bioressources (*Crotalaria juncea* L. et *Brachiaria ruziziensis* G. &E.) en zone cotonnière de l'Extrême-Nord, Cameroun. Thèse de Doctorat de l'Université de Maroua (Cameroun). 239 pages
- Hubert, F. (2008). Modélisation des diffractogrammes de minéraux argileux en assemblages complexes dans deux sols de climat tempéré. Implications minéralogique et pédologique. Thèse de doctorat de l'Université de Poitiers, Poitiers (France) 224 pages.
- IUSS Working Group WRB. (2006). World reference base for soil resources. 2nd edition. World Soil Resources Reports, No. 103. FAO, Rome. 145 p.
- Jamil, S., Abhilash, P., Singh, N. et Sharma, P. (2009). *Jatropha curcas*: a potential crop for phytoremediation of coal fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, 172(1), 269-275.

- Joker, D. et Jepsen, J. (2003). *Jatropha curcas* L. seed leaflet, No 83 August Danida Forest Seed Centre: Demark.
- Jones, D. L., Nguyen, C. et Finlay, R. D. (2009). Carbon flow in the rhizosphere: carbon trading at the soil–root interface. *Plant and Soil*, 321(1), 5-33. DOI 10.1007/s11104-11009-19925-11100.
- Juillet, A., Susplugas, J. et Courp, J. (1955). Oléagineux et leurs tourteaux: botanique, caractères, préparation, emplois. *Encyclopédie biologique (France) fre no. 49*, 642 p.
- Kagambèga, F. W., Nana, R., Bayen, P., Thiombiano, A. et Boussim, J. I. (2019). Tolérance au déficit hydrique de cinq espèces prioritaires pour le reboisement au Burkina Faso. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*. Volume 23 (2019), Numéro 4. DOI: [10.25518/1780-4507.18199](https://doi.org/10.25518/1780-4507.18199)
- Khalid, N., Majid, A., Tahir, M. B., Niaz, N. et Khalid, S. (2017). Carbonaceous-TiO₂ nanomaterials for photocatalytic degradation of pollutants: A review. *Ceramics International*, 43(17), 14552-14571.
- Kirtikar, K. et Basu, B. (1980). In; Indian Medicinal Plants, 2^{ème} Edition, 1st Edn., Vol. III: International Book Publishers, Dehradun. 1, 676-683
- Koko, I. K. D., Djego, J., Gbenou, J., Hounzangbé-Adoté, S. et Sinsin, B. (2011). Etude phytochimique des principales plantes galactogènes et emménagogues utilisées dans les terroirs riverains de la Zone cynégétique de la Pendjari. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 5(2).
- Komba Mayossa, P. C. (2019). Dégénération du couvert forestier liée à la culture du palmier à huile par télédétection en milieu tropical humide: application au bassin du Congo. Thèse de doctorat de l'Université Aix-Marseille, Marseille (France), 362 pages.

- Koranda, M., Schnecker, J., Kaiser, C., Fuchslueger, L., Kitzler, B., Stange, C. F., . . . Richter, A. (2011). Microbial processes and community composition in the rhizosphere of European beech—the influence of plant C exudates. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(3), 551-558.
- Kroetsch, D. et Wang, C. (2006). Chapter 55 - Particle size distribution in Carter MR, Gregorich EG (Eds) *Soil sampling and methods of analysis*, Second edition. CRC Press, Boca Raton, FL, 16 p.
- Kumar, C. M. et Ghoshal, N. (2017). Variation in Soil physicochemical properties in dry tropics: effect of land-use change. *Plant Archives*, 17(2), 1404-1410.
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B. et Christensen, R. H. (2017). lmerTest package: tests in linear mixed effects models. *Journal of Statistical Software*, 82(13), 1-26. DOI: 10.18637/jss.v18082.i18613.
- Labo, A. D., Sane, S., Ngom, D. et Akpo, L. E. (2016). Effet du sel sur le comportement des jeunes plants de palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.) en Basse Casamance. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 10(3), 1312-1328.
- Lahmar, R. et Ruellan, A. (2007). Dégradation des sols et stratégies coopératives en Méditerranée: la pression sur les ressources naturelles et les stratégies de développement durable. *Cahiers Agricultures*, 16(4), 318-323 (311).
- Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*, 12(6), 519-539.
- Lal, R. (2009). Soil degradation as a reason for inadequate human nutrition. *Food Security*, 1(1), 45-57.
- Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875-5895.

- Lawrey, J. D. (1977). The relative decomposition potential of habitats variously affected by surface coal mining. *Canadian Journal of Botany*, 55(11), 1544-1552.
- Leye, E., Ndiaye, M., Ndiaye, F., Diallo, B., Sarr, A., Diouf, M. et Diop, T. (2009). Effet de la mycorhization sur la croissance et le développement de *Jatropha curcas* L. *Journal of Renewable Energies*, 12(2), 269–278-269–278.
- Liniger, H., Lynden, G. V., Nachtergaele, F. et Schwilch, G. (2008). Un questionnaire pour La cartographie de la dégradation et de la gestion durable des terres. Food and Agriculture Organization, ISRIC (eds).140 pages.
- Lutz, A. (1992). Vegetable oil as fuel-an environmentally and socially compatible concept for Mali. *GATE (Eschborn)* (4), 38-46.
- Madhaiyan, M., Peng, N., Te, N. S., Hsin, C., Lin, C., Lin, F., Reddy, C., Yan, H., et Ji, L. (2013). Improvement of plant growth and seed yield in *Jatropha curcas* by a novel nitrogen-fixing root associated Enterobacter species. *Biotechnology For Biofuels*, 6(1), 140.
- Maier, C. et Kress, L. (2000). Soil CO₂ evolution and root respiration in 11 year-old loblolly pine (*Pinus taeda*) plantations as affected by moisture and nutrient availability. *Canadian Journal of Forest Research*, 30(3), 347-359.
- Makkar, H. P., Becker, K. et Schmook, B. (1998). Edible provenances of *Jatropha curcas* from Quintana Roo state of Mexico and effect of roasting on antinutrient and toxic factors in seeds. *Plant Foods for Human Nutrition*, 52, 31-36.
- Marone, D., Poirier, V., Coyea, M., Olivier, A. et Munson, A. D. (2017). Carbon storage in agroforestry systems in the semi-arid zone of Niayes, Senegal. *Agroforestry Systems*, 91, 941-954.

- Marche-Machard, J. (1969). *Monde Animal en Afrique intertropicale*. Edition, 3 ; Publisher, Éditions de l'École, 1969 ; Length, 608 pages.
- Martin, D. (1977). Les sols des cacaoyères du Woleu-Ntem (Gabon). *Cahiers ORSTOM. Série Pédologie*, 15(3), 303-318.
- Martin, G., Goudet, J.-P., Vaitilingom, G. et Azuclos, P. (1984). Utilisation de l'huile de pourghère comme carburant en milieu rural. Document technique et de recherche, Antony : GERDAT-CEEMAT, 15 p.
- Martin, G. et Mayeux, A. (1984). Réflexions sur les cultures oléagineuses énergétiques. II. Le pourghère (*Jatropha curcas* L.): un carburant possible. *Oléagineux*, 39(5), 283-287.
- Massoukou Pamba, R., Poirier, V. et Nguema Ndoutoumou, P. (2022). L'écartement de plantation affecte différemment la croissance végétative du *Jatropha curcas* L. en culture sur un sol surexploité au nord du Gabon. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 16(1), 158-172.
- Massoukou Pamba, R., Poirier, V., Nguema Ndoutoumou, P. et Epule, T. E. (2023). How Can Plants Help Restore Degraded Tropical Soils? *Land*, 12(12), 2147.
- Mbayngone, E. et Thiombiano, A. (2011). Dégradation des aires protégées par l'exploitation des ressources végétales: cas de la réserve partielle de faune de Pama, Burkina Faso (Afrique de l'Ouest). *Fruits*, 66(3), 187-202.
- Medza Mve, S. D., Mergeai, G., Baudoin, J.-P. et Toussaint, A. (2011). Culture in vitro de *Jatropha curcas* L. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 15(4), 567-574.
- MEPNRT (2007). Rapport annuel du Ministère de l'Environnement, de la Protection de la Nature, de la Recherche et de la Technologie, Cellule de Coordination de

Mise en oeuvre la Convention sur la lutte Contre la Désertification (CCMO/CCD), 76 pages.

Minengu, J., Mobambo, P. et Mergeai, G. (2015). Etude des possibilités de production de *Jatropha curcas* L. dans un couvert permanent de *Stylosanthes guianensis* (Aublet) Schwartz en association avec le maïs (*Zea mays* L.) et le soja (*Glycine max* (L.) Merr.) dans les conditions du Plateau des Batéké à Kinshasa. *Tropicicultura*, 33(4), 309-321.

Minengu, J. d. D., Mobambo, P. et Mergeai, G. (2014). Influence de l'environnement et des pratiques culturales sur la productivité de *Jatropha curcas* L. en Afrique subsaharienne (synthèse bibliographique). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 18(2), 290-300.

Minengu Mayulu, J. d. D. (2014). Etude des possibilités de culture de *Jatropha curcas* L. dans la région de Kinshasa en République Démocratique du Congo (RDC). Thèse de Doctorat de l'Université de Liège – Gembloux Agro-Bio Tech (Belgique), 178 pages.

Mitchard, E. T. (2018). The tropical forest carbon cycle and climate change. *Nature*, 559(7715), 527-534.

Monnier, G. (1966). Le concept de sol et son évolution. *Science du Sol*(1), 89-111.

Moreira, I. (1970). Bagaços de purgueira e de rícino. Ensaio sobre a sua toxicidade e valor fertilizante. *Anais do Instituto Superior de Agronomia*, (Portugal), Vol. 31, 31:191-222

Moussa, M., Chaibou, I., Laminou, O. M. et Banoïn, M. (2017). Effet de l'écartement sur la croissance des jeunes plants de *Jatropha curcas* L. (Euphorbiaceae) de quelques provenances au Sahel Niger. *Afrique Science*, 13(1), 24-39.

- Mukherjee, P. et Datta, M. M. (2007). Somatic embryogenesis in *Jatropha curcas* Linn., an important biofuel plant. *Plant Biotechnology Reports*, 1(3), 135-140.
- Munch, E. et Kiefer, J. (1986). Le Pourghere (*Jatropha curcas* L.), Botanique, écologie, culture. Rapport de Synthèse de l'Université de Stuttgart Hohenheim (Allemagne). 276 pages
- Nasr, N., Delpech, B., Flitner, M., Hulshof, M., Toreilles, J. et Twagiramungu, F. (1995). Quelle agriculture vivrière pour le nord du Gabon? *Agriculture et Développement N°8, décembre 1995*, pp 59-67.
- Nasser, L. (2002). Effect of boron deficiency on some physiological and biochemical aspects during the developmental stages of wheat (*Triticum aestivum* L.) plant. *OnLine Journal of Biological Sciences (Pakistan)*,(2), 470-476.
- Nguema Ndoutoumou, Bouanga, Massounga et Boussiengui Boussiengu. (2013). Étude comparée de trois méthodes de multiplication de *Jatropha curcas* L. dans les conditions climatiques du sud-est du Gabon. *Journal of Applied Biosciences*, 65, 4989-4998.
- Nguema Ndoutoumou, P. (2007). Étude histologique de l'embryogenèse chez *Phaseolus coccineus* L. et *P. vulgaris* L. et chez les hybrides réciproques entre ces deux espèces. Thèse de doctorat. Faculté universitaire des sciences agronomiques. Gembloux (Belgique). 172 p.
- Nguema Ndoutoumou, P., Ndong, A. N., Anda, C. C. O., Midoumbou, F. P. N., Ognalaga, M. et Missang, C. E. (2019). Régénération du cacaoyer (*Theobroma cacao* L.) sur un substrat à base de compost de *Jatropha curcas* L. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 13(2), 1043-1053.
- Nguema Ndoutoumou, P. N., Ovono, P. O., Gatarasi, T. et Okoumba, J. S. O. (2015). Effet des extraits de *Jatropha curcas* L. et de *Tabernanthe iboga* Baill. dans la

- lutte contre le scolyte du caféier (*Hypothenemus hampei* Ferrari) au Sud-Est du Gabon. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9(6), 2764-2775.
- Njomgang, R. et Tchienkoua, M. (1999). Recherche d'indicateurs de dégradation physique de trois séries de sols à hydroxydes de l'ouest Cameroun. L'influence de l'homme sur l'érosion: à l'échelle du versant. *Bulletin Réseau Erosion*, 19(1), 216-223.
- Noulèkoun, F., Naab, J. B., Lamers, J. P., Baumert, S. et Khamzina, A. (2018). Sapling biomass allometry and carbon content in five afforestation species on marginal farmland in semi-arid Benin. *New Forests*, 49(3), 363-382.
- Ogunwole, J., Chaudhary, D., Ghosh, A., Daudu, C., Chikara, J. et Patolia, J. (2008). Contribution of *Jatropha curcas* to soil quality improvement in a degraded Indian entisol. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B–Soil and Plant Science*, 58(3), 245-251.
- Ouattara, B., Ndir, K., Diedhiou, I., Diouf, D. et Akpo, L. E. (2011). Effect of water regimes and pre-sowing treatments on seeds germination of different provenances of *Jatropha curcas* L. Senegal. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 1(9), 151-156.
- Ouédraogo, M. (2006). Etude biologique et physiologique du pourghère: *Jatropha curcas* L.(Euphorbiacée) en vue d'une meilleure production de carburant de substitution. Thèse de Doctorat, Université de Ouagadougou. Ouagadougou, (Burkina Fasso) 281 pages.
- PANLCDT (2007). Mise en œuvre de la Convention sur la lutte contre la Désertification (CCD). Programme d'Action National de Lutte Contre la Dégradation des Terres au Gabon, Libreville (Gabon) 76 pages.

- Patel, D. et Saraf, M. (2013). Influence of soil ameliorants and microflora on induction of antioxidant enzymes and growth promotion of *Jatropha curcas* L. under saline condition. *European Journal of Soil Biology*, 55, 47-54.
- Patel, D. et Saraf, M. (2014). Comparative study of different soil amendments and microbes for integrated nutrient management and growth promotion of *Jatropha curcas*. *Journal of Plant Nutrition*, 37(14), 2209-2226.
- Paterson, E. (2003). Importance of rhizodeposition in the coupling of plant and microbial productivity. *European Journal of Soil Science*, 54(4), 741-750.
- Pimentel, Harvey, Resosudarmo, Sinclair, Kurz, McNair, Christ, Shpritz, Fitton, Saffouri. (1995). Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267(5201), 1117-1123.
- Poirier, V. (2019). AGR7140 - Les sols et les systèmes fourragers. Notes de cours. Université du Québec en Abitibi Témiscamingue.
- Poirier, V., Roumet, C. et Munson, A. D. (2018). The root of the matter: linking root traits and soil organic matter stabilization processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 246-259.
- Poitras Larivière, A. (2007). Compétition racinaire pour l'espace entre la végétation herbacée et des jeunes arbres de différents stades de succession. Mémoire de Maîtrise de l'Université du Québec à Montréal (Canada) 60 pages.
- Poorter, H. et Garnier, E. (1999). Ecological significance of inherent variation in relative growth rate and its components. *Handbook of Functional Plant Ecology*, 20, 81-120.
- Pouya, M. B., Gnankambary, Z., Savadogo, O. M., Ouandaogo, N., Sédogo, M. P. et Lompo, F. (2020). Valorisation agronomique des résidus de *Jatropha Curcas* L. comme fertilisant organique au Burkina Faso. *Afrique Science*, 16, 81-92.

- R Core Team. (2018). R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <http://www.R-project.org>.
- Rajot, J. L., Karambiri, H., Ribolzi, O., Planchon, O. et Thiebaut, J.-P. (2009). Interaction entre érosions hydrique et éolienne sur sols sableux pâturés au Sahel: cas du bassin-versant de Katchari au nord du Burkina Faso. *Science et Changements Planétaires/Sécheresse*, 20(1), 17-30.
- Record, P. (2012). Prota 11 (1): Medicinal plants/Plantesmédicinales 1. Record display: Consultado 23/01/2012. prota.org/PROTAhtml/Plantago, 8 pages.
- Reynolds, T. et Thompson, P. (1973). Effects of kinetin, gibberellins and (\pm) abscisic acid on the germination of lettuce (*Lactuca sativa*). *Physiologia plantarum*, 28(3), 516-522.
- Rishirumuhirwa et Roose. (1998). Rishirumuhirwa T., Roose Eric. (1998). Effets des matières organiques et minérales sur la réhabilitation des sols acides de montagne du Burundi. In : Congrès Mondial de la Science du Sol : Actes = World Congress of Soil Science : Proceedings. Montpellier : ORSTOM, 10 p. Congrès Mondial de la Science du Sol, 16., Montpellier (FRA), 1998/08/20-26.
- Ritchie, G. et Dolling, P. (1985). The role of organic matter in soil acidification. *Australian Journal of Soil Research*, 23(4), 569-576.
- Roose, E. (1983). Ruissellement et érosion avant et après défrichement en fonction du type de culture en Afrique occidentale. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, 20(4), 327-339.
- Roose, E. (1989). Gestion conservatoire des eaux et de la fertilité des sols dans les paysages soudano-sahéliens de l'Afrique Occidentale. Soil, Crop and Water Management Systems for Rainfed Agriculture in the Sudano-Sahelian Zone. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT),

- Patancheru, India, 55-72. *Soil, Crop and Water Management Systems for Rainfed Agriculture in the Sudano-Sahelian Zone. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT), Patancheru, India, 55-72.*
- Roose, E. (1993). Présentation: innovations dans la conservation et la restauration des sols. *Cahiers ORSTOM. Série Pédologie*, 28(2), 147-155.
- Roose, E. (1995). La GCES. Proposition d'une nouvelle approche de la lutte antiérosive pour Madagascar. *Réseau Erosion-Bulletin*, (15), 189-203.
- Roose, E., Ndayizigiye, F. et Sekayange, L. (1993). L'agroforesterie et la GCES au Rwanda: comment restaurer la productivité des terres acides dans une région tropicale de montagne à forte densité de population? *Cahiers ORSTOM. Série Pédologie*, 28(2), 327-349.
- Rossi, S. et Bousquet, J. (2014). The bud break process and its variation among local populations of boreal black spruce. *Frontiers in Plant Science*, 5, 574.
- Rudolf, G. (1961). Überarbeitete Neuausgabe von Geiger, R. : Köppen-Geiger / Klima der Erde. (Wandkarte 1:16 Mill.) – Klett-Perthes, Gotha.
- Rutishauser, R. (1995). Developmental patterns of leaves in Podostemaceae compared with more typical flowering plants: saltational evolution and fuzzy morphology. *Canadian Journal of Botany*, 73(9), 1305-1317.
- Saffache, P. (2001). De la dégradation à la restauration des sols: utilisation de méthodes traditionnelles et modernes en Haïti. *Courrier de l'environnement de l'INRA* N°45 de mai 2021.102-106.
- Sairam, R., Kumutha, D., Ezhilmathi, K., Deshmukh, P. et Srivastava, G. (2008). Physiology and biochemistry of waterlogging tolerance in plants. *Biologia Plantarum*, 52(3), 401-412.

- Samson, T. (2023). Historique-Météo.Net, Site édité par Des Clics Nomades, Parc Edonia, rue de la Terre Victoria- Bât. B, 35760 Saint Grégoire, France et hébergé par BEWEST, 55 rue Florimond Desbarbieux, 59170 CROIX, France, <https://www.historique-meteo.net/> (17/08/2023).
- Sangare M. N. (2001.). Motorisation villageoise à poste fixe, hors réseau électrique, dans les pays du Sahel et en particulier au Mali : Contribution à l'analyse des conditions d'amélioration, de développement et de l'introduction d'énergie renouvelables (biocarburant et énergie photovoltaïque). Thèse de Doctorat de l'Université du Mali, 250 p.
- Santos, A. A., Agustini, J. A., Maltoni, K. L. et Cassiolato, A. M. (2016). Addition of residues and reintroduction of microorganisms in *Jatropha curcas* cultivated in degraded soil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20, 372-377.
- Sarir, R. et Benmahioul, B. (2017). Etude comparative de la croissance végétative et du développement de jeunes semis de trois espèces de chênes (chêne vert, chêne liège et chêne zéen) cultivés en pépinière. *Agriculture and Forestry Journal*, 1(1), 42-48.
- Sartori, F., Lal, R., Ebinger, M. H. et Eaton, J. A. (2007). Changes in soil carbon and nutrient pools along a chronosequence of poplar plantations in the Columbia Plateau, Oregon, USA. *Agriculture, Ecosystems Environment*, 122(3), 325-339.
- Schmelzer, G. I. H. t. et Gurib-Fakim, A. (2008). Ressources végétales de l'Afrique tropicale, *Plantes médicinales 1*. Fondation PROTA / Backhuys Publishers / CTA Wageningen, Pays-Bas, 2008, 889 pages.

- Sepasal. (1999). Survey of Economic Plants for Arid and Semi-Arid Lands. [Internet] Royal Botanic Gardens, Kew, Richmond, United Kingdom. <http://www.kew.org/ceb/sepasal/>. Accessed 20/04/2021.
- Serpantié, G. et Ouattara, B. (2001). Fertilité et jachères en Afrique de l'Ouest. *La Jachère en Afrique Tropicale*, 2, 21-83.
- Silva, E., Alleoni, L. R. F., Santos, S., Magalhães, S. et Farnezi, M. (2016). Response of physic nut trees to liming of acidic soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(8), 1023-1032.
- Silveira. (1934). Contribution à l'étude du pulgère aux îles du Cap Vert. *Anais do Instituto Superior de Agronomia*, (Cap Vert) Vol. 6 (1), p. 116.
- Singh, A. (2006). Studies on arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Jatropha curcas* L. *Mycorrhiza News*, 18(3), 12-14.
- Singh, B., Singh, K., Rao, G. R., Chikara, J., Kumar, D., Mishra, D., Saikia S. P., Pathre U. V., Raghuvanshi, N. et Rahi, T. (2013). Agro-technology of *Jatropha curcas* for diverse environmental conditions in India. *Biomass and Bioenergy*, 48, 191-202.
- Singh, K., Singh, B. et Tuli, R. (2013). Sodic soil reclamation potential of *Jatropha curcas*: a long-term study. *Ecological Engineering*, 58, 434-440.
- Sitorus, H. B. H. (2015). The study of *Jatropha curcas* oil-based biodegradable insulation materials for power transformer. Doctoral thesis from the University of Ecully, Ecole centrale de Lyon. (France) 143 pages.
- Six, J., Conant, R., Paul, E. et Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter : Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241, 155-176.

- Sop, T. K., Kagambega, F. W., Bellefontaine, R., Schmiedel, U. et Thiombiano, A. (2012). Effects of organic amendment on early growth performance of *Jatropha curcas* L. on a severely degraded site in the Sub-Sahel of Burkina Faso. *Agroforestry Systems*, 86(3), 387-399.
- Soumana, D., Moustapha, A. M., Kolafane, A., Issa, A. et Nouhou, B. A. (2019). Effet du régime d'irrigation sur la germination et la croissance en pépinière de *Parkia biglobosa* (Jacq.) G. Don. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 40(1), 6573-6583.
- Srivastava, P., Kumar, A., Behera, S. K., Sharma, Y. K. et Singh, N. (2012). Soil carbon sequestration: an innovative strategy for reducing atmospheric carbon dioxide concentration. *Biodiversity and Conservation*, 21, 1343-1358.
- St. Clair, S. B., Sharpe, W. E. et Lynch, J. P. (2008). Key interactions between nutrient limitation and climatic factors in temperate forests: a synthesis of the sugar maple literature. *Canadian Journal of Forest Research*, 38(3), 401-414.
- Stäuble, N. I. (1986). Etude ethnobotanique des Euphorbiacées d'Afrique de l'Ouest. *Journal of Ethnopharmacology*, 16(1), 23-103.
- Steiner, K. G. et Williams, R. (1996). Causes of soil degradation and development approaches to sustainable soil management. Weikersheim : Margraf Verlag Reiskinchen (Allemagne), 51 pages.
- Sunil, N., Kumar, V. et Varaprasad, K. S. (2013). Origin, Domestication, Distribution and Diversity of *Jatropha curcas* L. (*Jatropha, challenges for a new energy crop*) Springer. 137-151.
- Sunil, N., Sivaraj, N., Anitha, K., Abraham, B., Kumar, V., Sudhir, E., Vanaja, M., et Varaprasad, K. (2009). Analysis of diversity and distribution of *Jatropha*

- curcas* L. germplasm using Geographic Information System (DIVA-GIS). *Genetic Resources and Crop Evolution*, 56(1), 115-119.
- Sylla, D. (2006). Identification des insectes inféodés au pourghère et leur impact sur le développement de la plante. Mémoire de fin de cycle ingénieur Institut Polytechnique Rural/Institut de Formation et de Recherche Appliquée de Katibougou. (Mali) 75 pages.
- Tewari, D. (2007). *Jatropha & Bio-Diesel*. Prabhat Prakashan. Edité par Ocean Books (P) Ltd. 30 pages.
- Théodore, A. K., Gnénakan, Y. et Justin, K. Y. (2021). Etude de l'influence de *Jatropha curcas* sur le rendement du maïs (*Zea mays* L.) en association culturale dans la région de Bingerville en Côte d'Ivoire. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 34(3), 532-542.
- Thibodeau, L., Raymond, P., Camiré, C. et Munson, A. D. (2000). Impact of precommercial thinning in balsam fir stands on soil nitrogen dynamics, microbial biomass, decomposition, and foliar nutrition. *Canadian Journal of Forest Research*, 30(2), 229-238.
- Thiébeau, P., Parnaudeau, V. et Guy, P. (2003). Quel avenir pour la luzerne en France et en Europe? *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA*, 49(49), 29-46.
- Touckia, G. I., Yongo, O. D., Abotsi, K. E., Wabolou, F. et Kokou, K. (2015a). Endogenous knowledge and local perception about *Jatropha curcas* in, Central African Republic. *Sciences de la Vie, de la Terre et Agronomie*, 3(1).
- Touckia, G. I., Yongo, O. D., Abotsi, K. E., Wabolou, F. et Kokou, K. (2015b). Essai de germination et de croissance au stade juvénile des souches locales de *Jatropha curcas* L. en République centrafricaine. *European Scientific Journal*, 11(15) ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431).

- Trabucco, A., Achten, W. M., Bowe, C., Aerts, R., ORSHOVEN, J. V., Norgrove, L. et Muys, B. (2010). Global mapping of *Jatropha curcas* yield based on response of fitness to present and future climate. *Gcb Bioenergy*, 2(3), 139-151.
- Üllenberg, A. (2007). *Jatropha* in Madagascar. Sachstandsbericht. Commissioned by Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ), Madagascar. 32 pages.
- Villegas, L. F., Fernández, I. D., Maldonado, H., Torres, R., Zavaleta, A., Vaisberg, A. J. et Hammond, G. B. (1997). Evaluation of the wound-healing activity of selected traditional medicinal plants from Peru. *Journal of Ethnopharmacology*, 55(3), 193-200.
- Villeneuve, V., Légaré, S., Painchaud, J. et Vincent, W. (2006). Dynamique et modélisation de l'oxygène dissous en rivière. *Revue des Sciences de l'Eau*, 19(4), 259-274.
- Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J. et Melillo, J. M. (1997). Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277(5325), 494-499.
- Walter, C. et Lemercier, B. (2008). Les sols bretons sont-ils menacés? *Bretagnes* (9), 30-35.
- Wang, X.-R. et Ding, G.-J. (2012). Reproductive biology characteristic of *Jatropha curcas* (Euphorbiaceae). *Revista de Biología Tropical*, 60(4), 1525-1533.
- Wani, S. P., Chander, G., Sahrawat, K. L., Rao, C. S., Raghvendra, G., Susanna, P. et Pavani, M. (2012). Carbon sequestration and land rehabilitation through *Jatropha curcas* (L.) plantation in degraded lands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 161, 112-120.
- Yang, C.-Y., Fang, Z., Li, B. et Long, Y.-f. (2012). Review and prospects of *Jatropha* biodiesel industry in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2178-2190.

- Yang, Q., Peng, D., Duan, Z., Wang, Z. et Sun, Q. (2007). Study on pollination biology of *Jatropha curcas* (Euphorbiaceae). *Journal of South China Agricultural University*, 28(3), 62-66.
- Yossi, H., Kaya, B., Traoré, C., Niang, A., Butare, I., Levasseur, V. et Sanogo, D. (2006). Les haies vives au Sahel: état des connaissances et recommandations pour la recherche et le développement, *World Agroforestry Centre*. 17-24.
- Zemmouri, N. (2020). Etude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort thermique et la marchabilité dans les espaces publics extérieurs Cas de la ville de Sidi Okba. Thèse de doctorat de l'Université Mohamed Khider–Biskra. (Maroc) 306 pages.
- Zhou, W., Chen, F., Meng, Y., Chandrasekaran, U., Luo, X., Yang, W. et Shu, K. (2020). Plant waterlogging/flooding stress responses: From seed germination to maturation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 148, 228-236.
- Ziadi, N. et Sen Tran, T. (2006). Chapter 7 - Mehlich 3-Extractable elements in Carter MR, Gregorich EG (Eds) *Soil sampling and methods of analysis*, Second edition. CRC Press, Boca Raton, FL, 8 p.
- Zima, G. G., Mialoundama, F., Yangakola, J. M. et Kossa, I. (2018). Importance des produits forestiers non ligneux médicinaux d'origine végétale et impacts des activités anthropiques sur leur durabilité dans le sud-ouest de la République Centrafricaine. *European Scientific Journal*, 14, 202-220.