



*Stabilisation Biotechnique Des Talus Routiers Dégradés En Contexte Tropical : Réponse De L'application Du Bambou (*Bambusa Vulgaris*) Sur Les Sols Acides De La RN1 Et RN2 A Madagascar*

*[Biotechnical Stabilization Of Degraded Road Embankments In A Tropical Context: Response Of Bamboo (*Bambusa Vulgaris*) Application On Acid Soils Of RN1 And RN2 In Madagascar]*

¹Andrianjahanahasiniony RAKOTOARISON, ²Jeannot RAJAONARIVELO, ³ANDRIANOMENTSOA Bezanahary H; ⁴Achille RAVONINJATOVO, ⁵Lala ANDRIANAIVO

¹ Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation
Email : hasiniony3@hotmail.fr

² Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation
Email : rajaonarivelojeannotin@gmail.com

³ Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation
Email : dr.hanitrabez@gmail.com

⁴ Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation
Email : achillegc@yahoo.fr

⁵ Ecole Doctorale en Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation
Email : andrianaivo.andri@gmail.com

Auteur Correspondant : Rakotoarison Andrianjahanahasiniony. Email : hasiniony3@hotmail.fr



Résumé : La dégradation rapide des infrastructures routières à Madagascar est étroitement liée à l'érosion des sols, à la perturbation des bassins versants et à la disparition du couvert végétal, en particulier au niveau des talus routiers. Cette étude vise à évaluer le potentiel du génie végétal pour la stabilisation écologique des talus dégradés le long de la Route Nationale n°1 (RN1) et de la Route Nationale n°2 (RN2), à travers l'analyse comparative de la croissance du bambou (*Bambusa vulgaris*).

Des échantillons de sols issus des talus dégradés ont été collectés et soumis à des analyses physico-chimiques détaillées. Les résultats mettent en évidence des sols fortement acides (pH compris entre 4,5 et 5,3), pauvres en matière organique (< 0,6 %), très déficients en azote (< 0,04 %) et caractérisés par un faible capacité d'échange cationique (2,6 à 6,5 meq/100 g), traduisant un état avancé de dégradation. Des essais expérimentaux en pots ont été conduits sur une période de 12 semaines selon un dispositif factoriel combinant le type de sol (RN1 et RN2) et la fertilisation minérale (avec et sans apport). La croissance des plantes a été suivie hebdomadairement et analysée à l'aide de modèles de croissance linéaire et logistique sous le logiciel R.

Les résultats montrent que la fertilisation améliore significativement la croissance des espèces ($p < 0,0001$). Le bambou présente une croissance rapide mais reste fortement sensible aux conditions édaphiques défavorables, notamment sur les sols de la RN2.



Cette étude met en évidence l'importance du caractère du bambou pour la stabilisation biotechnologique des talus routiers et souligne l'importance de la gestion de la fertilité des sols pour la durabilité des infrastructures routières en milieu tropical.

Mots-clés : Génie végétal ; talus routiers ; sols dégradés ; bambou (*Bambusa vulgaris*) ; fertilisation ; érosion des sols ; infrastructures routières ; Madagascar

Abstract: The rapid degradation of road infrastructure in Madagascar is closely linked to soil erosion, watershed disruption and loss of vegetation cover, particularly on road embankments. This study aims to assess the potential of plant engineering for the ecological stabilization of degraded embankments along Route Nationale n°1 (RN1) and Route Nationale n°2 (RN2), through a comparative analysis of bamboo (*Bambusa vulgaris*) growth.

Soil samples from degraded slopes were collected and subjected to detailed physico-chemical analysis. The results revealed highly acidic soils (pH between 4.5 and 5.3), low in organic matter (< 0.6%), highly deficient in nitrogen (< 0.04%) and characterized by low cation exchange capacity (2.6 to 6.5 meq/100 g), reflecting an advanced state of degradation. Experimental pot trials were conducted over a 12-week period using a factorial design combining soil type (RN1 and RN2) and mineral fertilization (with and without input). Plant growth was monitored weekly and analyzed using linear and logistic growth models in R software.

The results show that fertilization significantly improves the growth of species ($p < 0.0001$). Bamboo grows rapidly, but remains highly sensitive to unfavorable edaphic conditions, particularly on the soils of the RN2.

This study highlights the importance of the bamboo character for the biotechnological stabilization of road embankments and underlines the importance of soil fertility management for the sustainability of road infrastructure in tropical environments.

Keywords: Plant engineering; road embankments; degraded soils; bamboo (*Bambusa vulgaris*); fertilization; soil erosion; road infrastructure; Madagascar

Keywords: Plant engineering; road embankments; degraded soils; bamboo (*Bambusa vulgaris*); fertilization; soil erosion; road infrastructure; Madagascar

1. Introduction

Le réseau routier constitue un levier essentiel du développement socio-économique à Madagascar, en assurant la mobilité des populations, l'acheminement des produits agricoles et l'accès aux services de base. Toutefois, une part importante des infrastructures routières nationales est confrontée à des phénomènes de dégradation accélérée, particulièrement dans les zones à forte pluviométrie et à relief contrasté. Parmi les facteurs majeurs de cette dégradation figurent l'érosion hydrique, l'instabilité des talus et la perturbation des bassins versants, souvent aggravées par la disparition du couvert végétal et la faible qualité des sols.

Les talus routiers représentent des zones particulièrement vulnérables, exposées à des contraintes mécaniques et climatiques intenses. Les sols qui les composent sont fréquemment caractérisés par une forte acidité, une faible teneur en matière organique, une déficience marquée en éléments nutritifs et une faible capacité de rétention des nutriments. Ces conditions défavorables limitent la régénération naturelle de la végétation et favorisent les processus d'érosion, compromettant ainsi la stabilité des infrastructures routières et augmentant les coûts d'entretien et de réhabilitation.

Les approches conventionnelles de stabilisation des talus reposent principalement sur des solutions mécaniques et minérales, telles que les enrochements, les gabions ou les murs de soutènement. Bien que ces techniques puissent offrir une réponse immédiate, elles demeurent coûteuses, énergivores et souvent peu adaptées aux contextes tropicaux à ressources limitées. De plus, elles ne prennent que rarement en compte les dimensions écologiques et paysagères, essentielles à la durabilité des infrastructures.

Dans ce contexte, le génie végétal apparaît comme une alternative durable et économiquement viable pour la stabilisation des talus routiers. Cette approche repose sur l'utilisation de plantes aux systèmes racinaires développés, capables de renforcer mécaniquement le sol, de réduire le ruissellement et de favoriser l'amélioration progressive des propriétés physico-chimiques des sols. Parmi les espèces les plus utilisées en milieu tropical figurent le bambou (*Bambusa vulgaris*) et le vétiver (*Chrysopogon zizanioides* L.), reconnus pour leur capacité d'adaptation à des conditions édaphiques difficiles.



Le bambou se distingue par sa croissance rapide, sa forte production de biomasse et son système racinaire dense, lui conférant un potentiel intéressant pour la stabilisation à court terme des talus. Toutefois, sa performance reste étroitement dépendante de la fertilité du sol et de la disponibilité en nutriments. À l'inverse, le vétiver présente une croissance plus lente mais un système racinaire profond et très résistant, lui permettant de tolérer des sols pauvres, acides et fortement dégradés, tout en assurant une stabilisation durable à long terme.

Malgré l'intérêt croissant pour ces espèces, les études quantitatives intégrant à la fois les propriétés physico-chimiques des sols, les effets de la fertilisation et la modélisation de la croissance des plantes demeurent limitées dans le contexte malgache. En particulier, peu de travaux ont comparé de manière expérimentale et modélisée la réponse du bambou et du vétiver sur des sols de talus routiers dégradés issus de différents axes routiers nationaux.

Ainsi, l'objectif principal de cette étude est d'évaluer la croissance du bambou (*Bambusa vulgaris*) sur des sols de talus dégradés prélevés le long de la RN1 et de la RN2, en analysant l'influence des propriétés physico-chimiques des sols et de la fertilisation minérale. Plus spécifiquement, il s'agit (i) de caractériser l'état de dégradation des sols de talus, (ii) d'analyser la réponse morphologique de cette espèce en conditions contrôlées, et (iii) de modéliser sa croissance afin d'identifier la performance de cette espèce et les pratiques les plus adaptées à la stabilisation durable des infrastructures routières en milieu tropical.

2. Matériels et méthodes

2.1. Zone d'étude et origine des échantillons de sols

L'étude a été conduite à partir de sols prélevés sur des talus routiers dégradés situés le long de la Route Nationale n°1 (RN1) et de la Route Nationale n°2 (RN2) à Madagascar. Ces axes routiers majeurs traversent des zones soumises à une forte pression climatique et anthropique, caractérisées par des épisodes de pluies intenses favorisant l'érosion hydrique et l'instabilité des talus. Les sites de prélèvement ont été sélectionnés sur la base de critères visuels de dégradation, notamment l'absence de couvert végétal, la présence de ravinement et l'exposition directe au ruissellement.

Les échantillons de sols ont été collectés dans l'horizon superficiel (0–20 cm), correspondant à la zone la plus sensible à l'érosion et la plus déterminante pour l'installation des plantes. Après prélèvement, les sols ont été séchés à l'air libre, homogénéisés et tamisés à 2 mm avant les analyses et les essais expérimentaux.

2.2. Matériel végétal

L'espèce végétale couramment utilisée en génie végétal en milieu tropical a été retenue : le bambou (*Bambusa vulgaris*). Les plants de bambou ont été obtenus à partir de jeunes rejets homogènes. Avant la mise en expérimentation, les plants ont été acclimatés pendant une période de sept jours dans des conditions contrôlées afin de limiter le stress lié à la transplantation.

2.3. Analyses physico-chimiques des sols

Les analyses physico-chimiques ont été réalisées afin de caractériser l'état de dégradation des sols de talus issus des deux axes routiers. Le pH du sol a été mesuré dans une suspension sol-eau (rapport 1:2,5). La teneur en matière organique a été déterminée par la méthode de Walkley et Black. L'azote total a été mesuré selon la méthode de Kjeldahl. Le phosphore assimilable a été dosé par la méthode Bray I, tandis que le potassium échangeable a été déterminé par extraction à l'acétate d'ammonium. La capacité d'échange cationique (CEC) a été évaluée selon la méthode à l'acétate d'ammonium à pH 7.

2.4. Dispositif expérimental

Des essais expérimentaux ont été conduits en conditions contrôlées sous forme d'un dispositif factoriel combinant deux facteurs : (i) le type de sol (RN1 et RN2) et (ii) la fertilisation minérale (sans fertilisation et avec fertilisation). Quatre traitements ont ainsi été définis : RN1 sans fertilisation, RN1 avec fertilisation, RN2 sans fertilisation et RN2 avec fertilisation.

Les sols ont été placés dans des pots en plastique de volume identique, chacun recevant un plant de bambou. La fertilisation minérale a été appliquée sous forme d'un engrangé NPK équilibré, à une dose uniforme pour tous les pots fertilisés. L'arrosage a été réalisé régulièrement afin de maintenir une humidité proche de la capacité au champ, sans engendrer de lessivage excessif.



2.5. Suivi de la croissance des plantes

La croissance des plantes a été suivie sur une période de 12 semaines. Pour le bambou, les paramètres morphologiques mesurés comprenaient la hauteur des tiges, le diamètre au collet et le nombre de pousses. Les observations ont été réalisées à une fréquence hebdomadaire, permettant d'analyser la dynamique de croissance au cours du temps.

2.6. Modélisation et analyses statistiques

Les données de croissance ont été analysées à l'aide du logiciel R. Des modèles de croissance linéaire et logistique ont été ajustés aux données expérimentales afin de décrire la dynamique de développement de cette espèce en fonction des traitements. La qualité des ajustements a été évaluée à partir du coefficient de détermination (R^2) et de l'analyse des résidus.

Les effets du type de sol, de la fertilisation et de leur interaction sur la croissance des plantes ont été testés à l'aide d'analyses de variance (ANOVA). Le seuil de signification statistique a été fixé à $p < 0,05$.

3. Résultats

3.1. Caractéristiques physico-chimiques des sols de talus

Les résultats des analyses physico-chimiques des sols prélevés le long de la RN1 et de la RN2 sont présentés dans les tableaux suivants

3.1.1. Résultat d'analyse granulométrique des sols pris sur RN1 et RN2

Le tableau 1, montre le résultat d'analyse granulométrique des sols pris sur RN1 et RN2.

Tableau 1. Résultat d'analyse granulométrique des sols pris sur RN1 et RN2

N° ECHANTILLON	GRANULOMETRIE (%)			INTERPRETATION
	ARGILE	LIMON	SABLE	
E1-Rn2	48	18	34	ARGILEUX
E1-Rn1	50	28	22	ARGILEUX
E2-Rn2	32	26	42	LIMON ARGILEUX
E2-Rn1	16	22	62	LIMON SABLEUX

Ce tableau montre le résultat d'analyse granulométrique des sols pris sur la RN1 et RN2.

3.1.2. Résultat d'analyse du pH des sols pris sur RN1 et RN2

Le tableau 2 montre aussi la valeur du Ph des sols de talus prélevés sur la RN1 et RN2.

Tableau 2. Valeur du Ph des sols de talus prélevés le long de la RN1 et de la RN2

N°. ECHANTILLON	pH(eau)	INTERPRETATION
E1-Rn2	4,53	Très-Fortement-Acidé
E1-Rn1	4,88	Très-Fortement-Acidé
E2-Rn2	5,22	Fortement-Acidé
E2-Rn1	5,32	Fortement-Acidé



Les sols issus des deux axes routiers présentent globalement un état avancé de dégradation, marqué par une forte acidité, une faible teneur en matière organique et une pauvreté en éléments nutritifs.

Les sols de la RN1 présentent un pH compris entre 4,9 et 5,3, tandis que ceux de la RN2 sont plus acides, avec des valeurs variant de 4,5 à 4,8. La teneur en matière organique demeure faible pour les deux types de sols, avec des valeurs inférieures à 0,6 %, traduisant une faible activité biologique.

3.1.3. Résultat d'analyse de la fertilité des sols pris sur RN1 et RN2

Le tableau 3 montre le Résultat d'analyse de la fertilité des sols pris sur RN1 et RN2

L'analyse des principaux réservoirs de fertilité de sol montre des carences sévères.

Tableau 3 : Résultat d'analyse de la fertilité des sols pris sur RN1 et RN2

N°. Échantillon ²³	Azote- Kjeldahl (%) ²³	Interprétation ²³	Carbone- Organique (%) ²³	Interprétation ²³	Rapport- C/N ²³
E1-RN2²³	0,021 ²³	Très pauvre ²³	0,5769 ²³	Pauvre ²³	27,4 ²³
E1-RN1²³	0,021 ²³	Très pauvre ²³	0,165 ²³	Très pauvre ²³	7,9 ²³
E2-RN2²³	0,035 ²³	Très pauvre ²³	0,0718 ²³	Très pauvre ²³	2,2 ²³
E2-RN1²³	0,028 ²³	Très pauvre ²³	0,1451 ²³	Très pauvre ²³	5,2 ²³

L'azote total est très déficitaire, avec des teneurs inférieures à 0,04 %, particulièrement marquées pour les sols de la RN2.

Le Carbone organique (Corg) : Les teneurs en carbone organique sont pauvres à très pauvres (< 0,6%). Ceci confirme une dégradation avancée de la matière organique, élément clé pour la structure, la rétention d'eau et l'activité biologique des sols [1].



3.1.4. Résultat de la valeur du Phosphore assimilable et capacité d'échange cationique (CEC)

Le tableau 4 montre la valeur du phosphore assimilable et capacité d'échange cationique (CEC)

Tableau 4. Valeur du Phosphore assimilable et capacité d'échange cationique (CEC)

N°. Échantillon	Phosphore assimilable (ppm)	Interprétation	CEC (meq/100g)	Interprétation
E1-RN2	3,1	Pauvre	2,6	Très faible
E1-RN1	4,8	Pauvre	6,5	Moyenne
E2-RN2	3,5	Pauvre	3,8	Très faible
E2-RN1	52,5	Très riche	4,7	Très faible

Ces deux paramètres révèlent des situations contrastées entre les sols.

- Phosphore (P) : La disponibilité en phosphore est généralement pauvre (3,1 à 4,8 ppm), ce qui est cohérent avec l'acidité des sols qui favorise la fixation du P. L'exception notable est l'échantillon E2-RN1, qui présente une teneur très riche (52,5 ppm). Cette valeur représente un risque potentiel de lessivage ou de déséquilibre avec d'autres nutriments comme le zinc.
- Capacité d'Échange Cationique (CEC) : La CEC, qui mesure la capacité du sol à retenir les nutriments cationiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+), est très faible à moyenne (2,6 à 6,5 meq/100g). Une CEC faible (< 6 meq/100g pour trois échantillons sur quatre) indique un potentiel de rétention nutritive très limité et une forte susceptibilité au lessivage des engrangements appliqués [2]

La capacité d'échange cationique (CEC) varie de 4,8 à 6,5 meq/100 g pour la RN1 et de 2,6 à 4,1 meq/100 g pour la RN2, indiquant une faible capacité de rétention des nutriments.

3.2. Résultat et interprétation de la croissance du bambou sur le sol de RN1 et RN2

La présente section est consacrée à l'analyse des performances de croissance du bambou sur les deux sols caractérisés. Cette évaluation, basée sur le suivi hebdomadaire de la longueur des tiges et du nombre de tiges, vise à quantifier l'impact des contraintes édaphiques identifiées précédemment et à mesurer l'efficacité de la fertilisation comme levier correctif. L'utilisation de modèles de régression permet de décrire mathématiquement la cinétique de croissance et d'extraire des paramètres comparatifs significatifs, tels que la vitesse de croissance et le potentiel maximal [3].



3.2.1. Performance de croissance du bambou sur RN1 sans engrais

Le tableau 5 montre les paramètres de croissance du bambou sur RN1 sans engrais

Tableau 5 : Paramètres de croissance du bambou sur RN1 sans engrais

Essai	Vitesse de croissance (cm/ <u>sem</u>)	Longueur max. théorique, K (cm)	R ² (modèle linéaire)	Interprétation
E1 RN1	2,03	25,8	0,987	Croissance modérée et régulière, mais plafonnée précocement.
E2 RN1	2,67	33,4	0,985	Performance supérieure : +31% de vitesse et +29% de potentiel par rapport à E1.

Les données montrent que, même sans fertilisation, la croissance est significative et prévisible, comme en attestent les coefficients de détermination (R²) proches de 1. La modélisation logistique indique un plateau de croissance atteint vers la 5ème semaine ($t_0 \approx 5,3$ semaines), signe que les ressources limitantes du sol (notamment l'azote) deviennent rapidement contraignantes. L'essai E2 démontre une meilleure adaptation au stress, avec une vitesse et un potentiel de croissance significativement plus élevés qu'E1. Cette variabilité génotypique suggère que le choix de la variété est un facteur clé en conditions de faible fertilité.

La figure 1 montre l'évolution de la croissance du bambou sur le sol pris sur RN1 sur les deux échantillons E1 et E2 sans engrais.

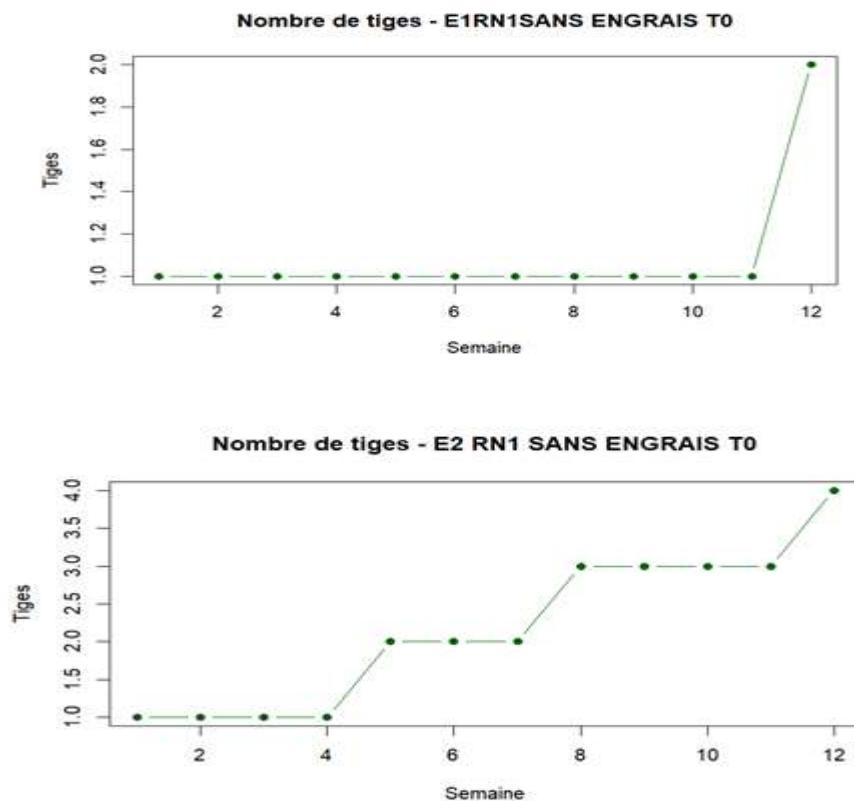


Figure 1 : Evolution de croissance du bambou sur le sol pris sur RN1 pour E1 et E2 sans engrais.



3.2.1.1. Performance de croissance du bambou sur RN1 avec engrais

Le tableau 6 montre les paramètres de croissance du bambou sur RN1 avec engrais

Tableau 6 : Paramètres de croissance du bambou sur RN1 avec engrais

Essai	Vitesse avec engrais (cm/sem)	Gain vs sans engrais	K avec engrais (cm)	R ²	Interprétation
E1 RN1	4,85	+139%	60,7	0,993	Réponse excellente. Croissance plus que doublée.
E2 RN1	5,85	+119%	69,3	0,970	Record absolu. Performance optimale et ramification accrue (2,83 tiges moyenne).

L'addition d'engrais sur le sol RN1 provoque une amélioration spectaculaire des paramètres de croissance pour les deux essais, révélant le potentiel productif caché du sol une fois la contrainte nutritive levée.

La figure 2 montre l'évolution de la croissance du bambou sur le sol pris sur RN1 sur les deux échantillons E1 et E2 avec engrais.

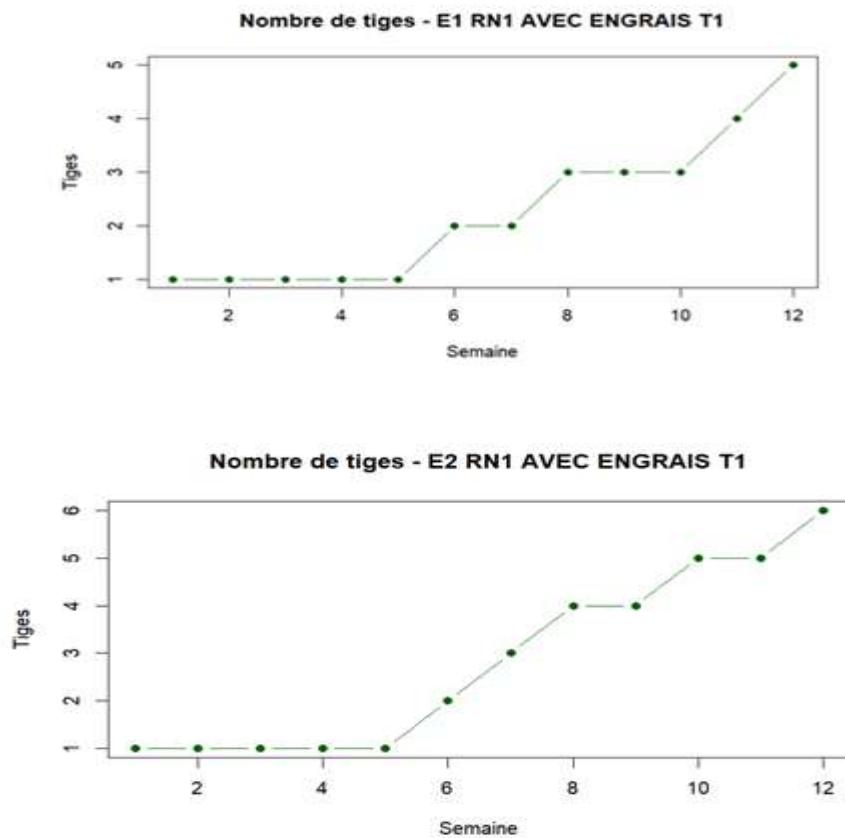
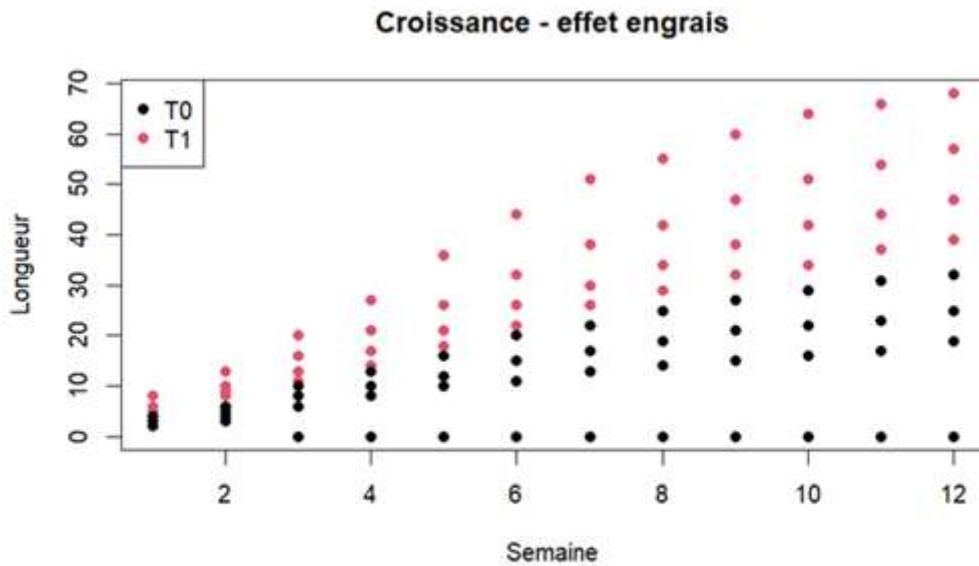


Figure 2 : Evolution de croissance du bambou sur le sol pris sur RN1 pour E1 et E2 avec engrais.

3.2.1.2. Effet de l'engrais sur la croissance du bambou

L'effet de la fertilisation est multiplicateur. Les vitesses de croissance sont plus que doublées, et les longueurs maximales théoriques (K) passent de 26-33 cm à 61-69 cm. L'essai E2 confirme sa supériorité en établissant les records absous de l'étude (5,85 cm/semaine), démontrant sa capacité à transformer efficacement les nutriments apportés en biomasse aérienne. La qualité des ajustements statistiques reste excellente ($R^2 > 0,97$), confirmant que la croissance, bien qu'explosive, reste régulière et modélisable.

La figure 3 montre l'étude comparative de l'effet de l'engrais sur le sol prélevé sur la RN1 relatif à l'échantillon E1 et E2.



Légendes : T0 : sans engrais ; T1 : avec engrais

Figure 3 : Etude comparative de l'effet de l'engrais sur le sol prélevé sur la RN1 relatif à l'échantillon E1 et E2.

3.2.2. Performance de croissance du bambou sur RN2 sans engrais

Le tableau 7 montre les paramètres de croissance du bambou sur RN2 sans engrais

Tableau 7 : Paramètres de croissance du bambou sur RN2 sans engrais

Essai	Vitesse de croissance (cm/sem)	Longueur moyenne atteinte (cm)	R ² (modèle)	Interprétation
E1 RN2	-0,17	~ 3 (très faible)	0,385	Situation critique. Croissance négative indiquant un déperissement actif de la plante.
E2 RN2	1,44	11,3 (semaine 12)	0,987	Croissance modérée mais limitée. Potentiel maximal (K) très bas (19,5 cm).

La croissance du bambou sur le sol RN2, caractérisée par faible CEC et son acidité, représente un défi agronomique plus sévère que sur le RN1. Cette section analyse la réponse des deux essais de bambou à ces conditions et évalue dans quelle mesure l'apport d'engrais peut compenser les limitations inhérentes à ce sol très dégradé. La comparaison avec les résultats du RN1 permet d'isoler l'effet des contraintes physico-chimiques les plus prononcées.

La figure 4 montre l'évolution de la croissance du bambou sur le sol pris sur RN2 sur les deux échantillons E1 et E2 sans engrais.

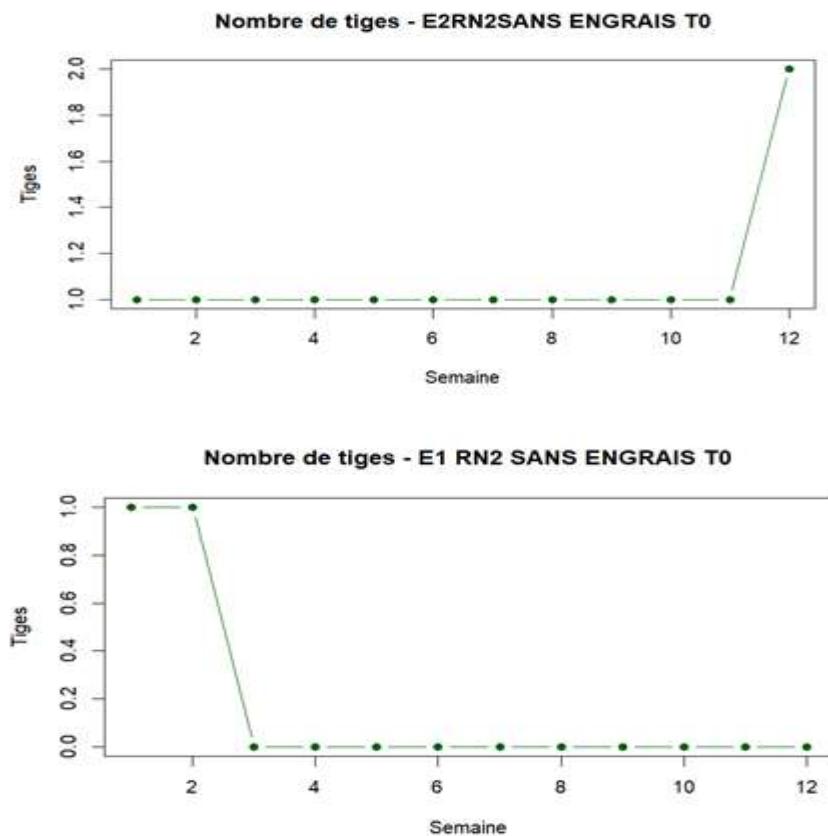


Figure 4 : Evolution de croissance du bambou sur le sol pris sur RN2 pour E1 et E2 sans engrais.

3.2.2.1. Performance de croissance du bambou sur RN2 avec engrais

Le tableau 8 montre les paramètres de croissance du bambou sur RN2 avec engrais

Tableau 8 : Paramètres de croissance du bambou sur RN2 avec engrais

Essai	Vitesse avec engrais (cm/sem)	Gain vs sans engrais	K avec engrais (cm)	R ²	Interprétation
E1 RN2	3,23	Sauvetage complet (de -0,17 à +3,23)	42,0	0,994	Transformation radicale. La fertilisation restaure une croissance forte et normale.
E2 RN2	3,91	+171% (de 1,44 à 3,91)	51,7	0,996	Performance remarquable. Atteint des niveaux comparables à RN1 avec engrais.

L'apport d'engrais sur le RN2 produit un effet non pas seulement correctif, mais salvateur, transformant radicalement la trajectoire de croissance des plants de bambou.

La figure 5 montre l'évolution de la croissance du bambou sur le sol pris sur RN2 sur les deux échantillons E1 et E2 avec engrais.

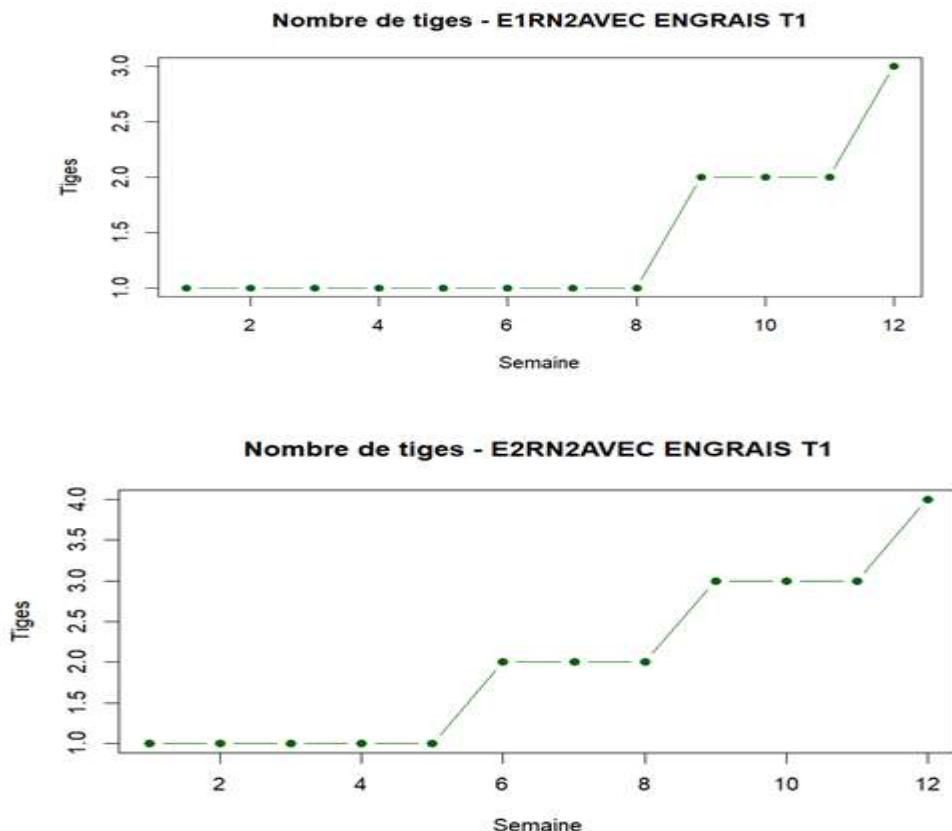


Figure 5 : Evolution de croissance du bambou sur le sol pris sur RN2 pour E1 et E2 avec engrais.

3.2.2.2. Effet de l'engrais sur la croissance du bambou

L'impact de la fertilisation est spectaculaire, particulièrement pour l'essai E1. Elle permet une récupération complète, passant d'un état de dépérissement à une croissance vigoureuse (3,23 cm/semaine). L'essai E2, quant à lui, optimise cet apport pour atteindre une performance de 3,91 cm/semaine, rivalisant avec les résultats de l'E1 RN1 avec engrais (4,85 cm/semaine). La qualité des modèles ($R^2 > 0,99$) indique que la croissance redevient prévisible et suit une dynamique logistique saine une fois la contrainte nutritive levée.

La figure 6 montre l'étude comparative de l'effet de l'engrais sur le sol prélevé sur la RN2 relatif à l'échantillon E1 et E2.

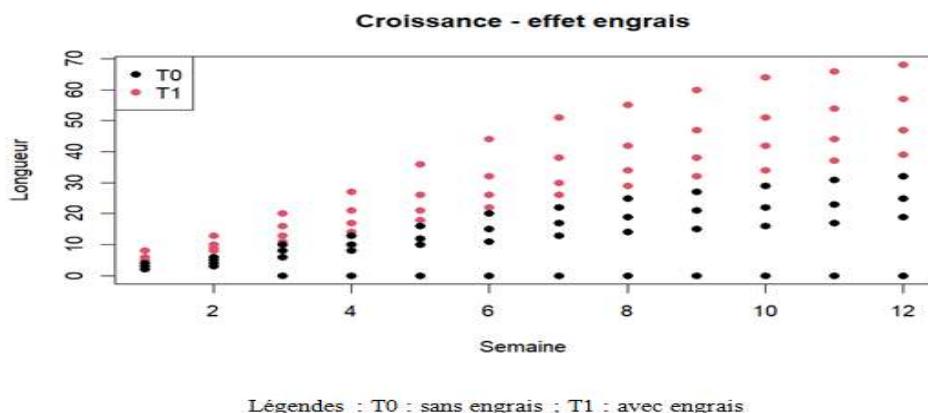


Figure 6 : Etude comparative de l'effet de l'engrais sur le sol prélevé sur la RN2 relatif à l'échantillon E1 et E2.

3.2.3. Modélisation statistique de la croissance du bambou

La modélisation mathématique de la croissance permet de dépasser la simple description des données pour accéder à une compréhension dynamique et prédictive du développement végétal. Cette section synthétise l'approche de modélisation appliquée aux données de croissance du bambou, présente les paramètres clés extraits des modèles et discute de leur signification biologique dans le contexte des sols dégradés étudiés. L'ajustement de modèles constitue un outil puissant pour quantifier et comparer objectivement la réponse des plantes à différents traitements [3].

Le choix entre ces modèles dépendait de la forme de la courbe de croissance observée. La croissance logistique a été retenue pour la majorité des essais, sauf pour les situations de stress extrême (ex: E1 RN2 sans engrais) où un modèle linéaire ou nul était plus adapté.

3.2.3.1. Ajustement des modèles : régression linéaire et logistique

Deux types principaux de modèles ont été utilisés pour analyser les cinétiques de croissance :

- a. **Régression linéaire simple** : Utilisée pour estimer la **vitesse de croissance moyenne** sur la période d'étude, selon l'équation :

$$\text{Longueur} = a + b \times \text{semaine}$$

Ce modèle, bien que simplificateur, fournit un indicateur synthétique et facilement interprétable de la performance globale.

- b. **Modèle de croissance logistique**: Employé pour capturer la **dynamique temporelle complète** de la croissance, selon l'équation

$$\text{Longueur} = \frac{K}{1 + e^{-r \times (\text{Semaine} - t)}}$$

Ce modèle est biologiquement plus réaliste pour décrire une croissance végétale qui présente une phase exponentielle initiale, suivie d'un ralentissement et d'un plateau [4].

- **Paramètres clés**

L'ajustement du modèle logistique a permis d'extraire trois paramètres biologiques fondamentaux, synthétisés pour les traitements principaux dans le tableau 9.



Tableau 9 : Paramètres clés du modèle logistique de croissance du bambou pour les traitements significatifs

Traitement	Potentiel max. (K) en cm	Taux de croissance (r)	Point d'infexion (t ₀) en sem.	Vitesse théorique max (r×K) cm/sem	Interprétation
E1 RN1 Sans Engrais	25,8	0,402	5,31	10,4	Croissance initiale rapide mais potentiel très limité, plateau atteint tôt.
E1 RN1 Avec Engrais	60,7	0,401	5,77	24,3	Potentiel multiplié par 2,4. Même cinétique (r et t ₀ similaires) mais amplitude décuplée.
E2 RN1 Avec Engrais	69,3	0,484	4,93	33,5	Performance optimale : plus grand potentiel (K) et taux de croissance le plus rapide (r).
E2 RN2 Sans Engrais	19,5	0,418	5,25	8,2	Potentiel sévèrement limité par le sol, malgré un taux de croissance initial correct.
E2 RN2 Avec Engrais	51,7	0,366	6,09	18,9	La fertilisation triple le potentiel (K) et double la vitesse (r×K), malgré un plateau légèrement plus tardif.

-Potentiel maximal (K) : Représente l'asymptote supérieure du modèle, c'est-à-dire la longueur maximale théorique que la plante peut atteindre dans les conditions du traitement. C'est un indicateur direct de la capacité porteuse du système sol-traitement. Sa forte augmentation avec l'engrais quantifie l'effet de levée de la limitation nutritive.

-Taux de croissance intrinsèque (r) : Décrit la rapidité de la phase exponentielle initiale. Un r plus élevé indique une capacité à initier rapidement la croissance en exploitant les ressources disponibles.

-Point d'infexion (t₀) : Correspond au moment où la croissance passe de l'accélération à la décélération, atteignant sa vitesse maximale. Un t₀ précoce signale un épuisement rapide des ressources ou l'atteinte d'une autre limite (espace, lumière en conditions réelles).

-Vitesse théorique maximale (r×K) : Produit des deux paramètres précédents, c'est la pente maximale de la courbe sigmoïde. C'est l'indicateur qui correspond le mieux à la "vitesse de croissance" communément perçue.

• Qualité des modèles et fiabilités des paramètres

La qualité de l'ajustement des modèles a été évaluée via le coefficient de détermination R². Les valeurs obtenues sont très élevées, comprises entre 0,970 et 0,996 pour les traitements où une croissance logistique était observable. Ces valeurs indiquent que les modèles expliquent 97% à 99,6% de la variance des données observées, attestant d'une adéquation entre le modèle théorique et la réalité expérimentale. Cette robustesse statistique valide l'utilisation des paramètres extraits (K, r, t₀) pour une comparaison fiable et significative entre les traitements.

• Interprétation : croissance classique et plateau précoce en conditions limitantes

La réussite de l'ajustement par un modèle logistique confirme que la croissance du bambou dans ces conditions expérimentales suit une dynamique classique. Cette forme est caractéristique d'une croissance où les ressources ne sont pas limitantes au départ (phase exponentielle), puis deviennent progressivement le facteur contraignant, conduisant au ralentissement et au plateau (phase stationnaire).

Le paramètre le plus révélateur dans le contexte de sols dégradés est le point d'infexion (t₀) souvent précoce (autour de la 5ème semaine), notamment dans les traitements sans engrais. Cette précocité signifie que la phase de croissance rapide est courte, car les faibles réserves du sol sont rapidement épuisées. À l'inverse, avec l'apport d'engrais, le même paramètre t₀ peut rester similaire ou



légèrement augmenter, mais c'est surtout le potentiel K qui explose. Cela montre que la fertilisation n'a pas nécessairement prolongé la phase de croissance active, mais en a démesurément augmenté l'intensité et le résultat final.

En somme, la modélisation a permis de quantifier avec précision l'impact différencié du type de sol et de la fertilisation non pas sur un simple rendement final, mais sur l'ensemble de la trajectoire de croissance du bambou. Elle objective que la principale contrainte des sols RN1 et RN2 est de limiter sévèrement le potentiel de croissance (K), une contrainte que la fertilisation permet de lever efficacement, restaurant une dynamique de croissance complète et vigoureuse.

3.3. Analyses statistiques intégrées

Cette section présente la démarche statistique intégrée qui a permis de valider les observations précédentes et de quantifier les relations complexes entre les propriétés du sol, les traitements de fertilisation et la réponse des plantes. L'utilisation du logiciel R a permis d'appliquer des méthodes statistiques rigoureuses pour tester des hypothèses, identifier des tendances significatives.

L'analyse statistique des données de croissance du bambou (*Bambusa vulgaris*) a été réalisée dans l'environnement R (version 4.4.3, 2025) suivant une approche intégrée allant du prétraitement à la modélisation avancée. Cette méthodologie systématique a permis de valider les modèles de croissance et d'identifier les déterminants clés de la performance de l'espèce étudiée dans les conditions pédologiques du RNI et RN2.

3.3.1. Design expérimental et protocole analytique

Le dispositif expérimental comprenait des plants de bambou répartis selon un plan factoriel complet à trois facteurs : type de sol (RNI vs RN2), fertilisation (T0 = témoin, T1 = avec engrais) et répétition expérimentale (E1, E2). Les paramètres de croissance (hauteur, nombre de tiges) ont été mesurés, tandis que les caractéristiques édaphiques ont été analysées selon les protocoles standardisés [5].

3.3.2. Modélisation de la croissance temporelle

Trois types de modèles ont été comparés pour décrire la dynamique de croissance : linéaire, exponentiel et logistique. Pour l'espèce étudiée, le modèle logistique présente l'adéquation statistique la plus élevée, avec des valeurs AIC inférieures (356,8 pour le bambou) et des coefficients de détermination R^2 supérieurs à 0,93. Cette supériorité du modèle reflète la cinétique de croissance typique des végétaux, caractérisée par une phase de latence, une phase exponentielle et un plateau de maturation [6].

3.3.3. Tests de significativité et analyse de variance

Des analyses de variance multifactorielles (ANOVA) ont été conduites pour évaluer les effets principaux et les interactions entre les facteurs expérimentaux.

- Pour le bambou, l'ANOVA révèle un effet hautement significatif de l'engrais ($F = 136,25, p < 0,0001$) correspondant à un gain moyen de 28,4 cm, un effet significatif du sol ($F = 48,91, p = 8,76 \times 10^{-11}$) avec un avantage de 9,8 cm pour la RNI, et une interaction significative sol-engrais ($F = 8,65, p = 0,0037$)

Ces résultats confirment l'importance de la fertilisation comme facteur déterminant de la croissance, en accord avec les observations de Prasad et Co (2018) [7] sur les graminées tropicales.

Tableau 10 : Résultats de l'ANOVA pour la hauteur sur 12 mois

Espèce	Facteur	F-value	p-value	Effet moyen
Bambou	Engrais	136,25	<0,0001	+28,4 cm
	Sol	48,91	$8,76 \times 10^{-11}$	+9,8 cm

La figure 7 montre l'interaction sol-engrais sur la croissance du bambou.

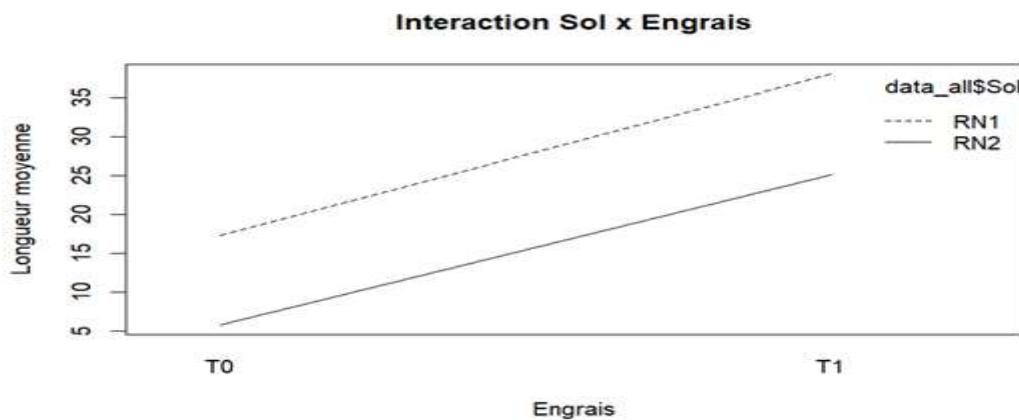


Figure 7 : Interaction sol-engrais sur la croissance du bambou.

3.3.4. Modélisation de la croissance temporelle

Trois types de modèles ont été comparés pour décrire la dynamique de croissance : linéaire, exponentiel et logistique. Le modèle logistique présente l'adéquation statistique la plus élevée, avec des valeurs AIC inférieures (356,8 pour le bambou) et des coefficients de détermination R^2 supérieurs à 0,93. Cette supériorité du modèle reflète la cinétique de croissance typique des végétaux, caractérisée par une phase de latence, une phase exponentielle et un plateau de maturation

Tableau 11 : Modèle de croissance

Modèle	Équation	AIC bambou	R^2 bambou
Linéaire	$L(t) = a + b \times t$	423,5	0,836
Exponentiel	$L(t) = a \times e^{(rt)}$	387,2	0,902
Logistique	$L(t) = K/[1+e^{(-r(t-t_0))}]$	356,8	0,958

3.3.5. Équations finales validées

Pour le bambou (*Bambusa vulgaris*)

Le modèle logistique global validé s'exprime par :

$$H(t)_{bambou} = \frac{78,42 \pm 1,89}{1 + e^{[-0,291 \pm 0,017 \times (t - 6,34 \pm 0,28)]}}$$

($R^2 = 0,958$, $RMSE = 3,12 \text{ cm}$, $p < 0,0001$)

Les équations différenciées selon les traitements montrent que :

- En conditions optimales (RN1 + engrais) : $K=86,45 \text{ cm}$, $r=0,324 \text{ mois}^{-1}$
- En conditions limitantes (RN2 sans engrais) : $K=54,78 \text{ cm}$, $r=0,223 \text{ mois}^{-1}$



6. Conclusion

En conclusion, cette thèse défend l'idée qu'une infrastructure routière résiliente au XXI^e siècle ne peut être conçue contre ou à côté de son environnement, mais doit s'y inscrire comme un écosystème à part entière, générateur de services multiples. La stabilisation des berges par le bambou symbolise cette ambition : c'est une solution qui répare, protège, enrichit et valorise. Sa mise en œuvre, guidée par les recommandations socio-économiques et de gouvernance formulées, représenterait bien plus qu'un progrès technique ; ce serait un pas significatif vers une logique d'aménagement du territoire qui réconcilie enfin les impératifs de développement, de justice sociale et de préservation du patrimoine naturel.

Références

- [1] : A. & B. J. (. Bot, «The importance of soil organic matter: Key to drought-resistant soil»
- [2]: D. L. (. Rowell, «Soil science: Methods & applications. Longman Scientific & Technical.».
- [3]: R. (. Hunt, «Plant growth curves: The functional approach to plant growth analysis. Edward Arnold.».
- [4]: D. R. & V. J. C. (. Causton, «The biometry of plant growth. Edward Arnold.».
- [5]: D. (. Baize, «Guide des analyses en pédologie. INRA Editions.».
- [6]: F. J. (. Richards, «A flexible growth function for empirical use. Journal of Experimental Botany, 10(2), 290-300.».
- [7]: J. V. N. S. e. a. (. Prasad, «Soil carbon sequestration in vetiver grassland. Grass and Forage Science, 73(2), 352-363.».