FORESTREECULTURE 2

ADEME **FEDER**

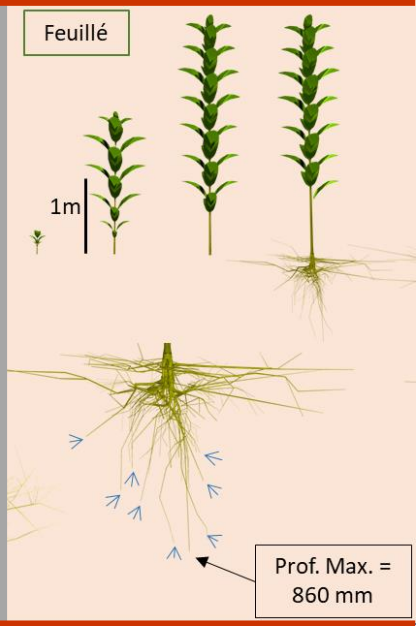
1745C00XX **GY0011202**

2017-2022 **2017-2021**

MAI 2023

5

SUIVI DE LA CROISSANCE DES ARBRES



Protocole expérimental : Eric Nicolini[1], Olivier Monteuuis[1], Hervé Rey[1].

Prises de données sur le terrain : Claire Atger[@], Jean-françois Barczi[1], Maxime Bellifa[2], Vincent Bézard[3], Antoine Galiana[1], Xavier Guerrini[1], Alexandre de Haldat du Lys[1], Patrick Heuret[2], Alex Fédélique[4], Olivier Monteuuis[1], Eric Nicolini[1] et Hervé Rey[1].

Analyses en laboratoire : Maxime Bellifa[2], Alexandre de Haldat du Lys[1], Alex Fédélique[4], Antoine Galiana[1], Patrick Heuret[2], Olivier Monteuuis[1] et Eric Nicolini[1].

Rédaction du chapitre : Eric Nicolini[1].

[1] CIRAD, [2] INRAE, [3] ONF, [4] UM2

Suivi de la croissance des arbres

Observer l'impact des différents protocoles de plantation sur l'installation des plants

Contexte. Le stress hydrique saisonnier constitue un obstacle majeur que les arbres doivent régulièrement franchir pour poursuivre leur programme de développement. Dans le contexte du changement climatique, cet aspect revêt toute son importance, *a fortiori* chez de jeunes plants forestiers récemment plantés en plein découvert : plus tôt les racines coloniseront les horizons profonds du sol, plus tôt le plant sera à l'abri du stress hydrique saisonnier de la grande saison sèche.

La dynamique d'installation des plants au champ dépend de l'état (équilibre caulinaire/racinaire) des plants élevés en conteneurs : les plants « forcés » en pépinière par une irrigation et une fertilisation soutenus développent des systèmes caulinaires hypertrophiés soutenus par des systèmes racinaires réduits, équilibre qui les condamne à disparaitre à court terme après la plantation. En revanche, des plants « endurcis » par une exposition à la pleine lumière et soumis à un espacement de l'irrigation, développent des systèmes racinaires plus forts et sont plus résistants à la transplantation. La réduction excessive de la taille des conteneurs peut aussi avoir un impact notable sur le développement du système racinaire et la phase d'installation des plants. *Ce sont 2 aspects qui seront traités dans le WP3.*

Mais la dynamique d'installation dépend aussi de l'état des sols dans lesquels, les plants sont transplantés. L'eau disponible dans le sol est un aspect premier. L'irrigation au champ en saison sèche va atténuer le stress hydrique saisonnier et favoriser le développement des plants. Cependant cette opération très couteuse sur le plan financier et environnemental, sera difficilement envisageable. Le tassement du sol constitue aussi un frein au développement du système racinaire. La réalisation d'un sous-solage, visant à ameublir les horizons profonds sans perturber leur agencement vertical est une opération qui peut avoir un impact notable sur la disponibilité en eau des sols, sur la dynamique d'installation des systèmes racinaires des plants et réduire par la suite les efforts d'entretien, comme les efforts de plantation puisque le sol ameubli facilite la trouaison généralement couteuse en temps et main d'œuvre. La fertilisation au champ va pouvoir accélérer la croissance des plants et leur dégagement du recru.

Objectifs

1. Etudier le développement caulinaire et racinaire des arbres
2. Caractériser l'impact des différents conditionnements en pépinière et des opérations au champ sur la phase d'installation des arbres
3. Comparer la résistance à la sècheresse estivale des espèces plantées.

- Plan 4
- 1 Le site de Regina-Toulouri 5
    - A Pourcentage de survie, taux de mortalité et état sanitaire 6
        - Bagasse 7
        - Niangons 10
        - Cordias 13
        - Ingas 15
        - Tecks 16
    - B Hauteurs, diamètres et taux de croissance 17
        - Bagasses 19
        - Tecks 22
        - Cordias 30
        - Niangons 31
        - Ingas 35
    - C Conformation des arbres 35
        - Bagasses 35
        - Cordias 37
        - Niangons 38
        - Tecks 38
    - D Effet de la présence du couvert herbacé de *Stylosanthes guianensis* sur la quantité d'azote foliaire des arbres plantés 39
    - E Complément d'information 41
        - Niangons 42
        - Bagasses 42
        - Tecks 44
        - Cordias 45
    - F Synthèse 47
- 2 Le site de Paracou 50
    - A/ Taux de survie, taux de mortalité et état sanitaire 51
    - B/ Hauteurs, diamètres et taux de croissance. 52
        - Tecks 56
        - Bagasses 58
        - Cordias 59
        - Niangons 61
        - Ingas 61
    - C/ Conformations des arbres après 23 mois 62
        - Tecks 62
        - Bagasses 63
    - D/ Synthèse. 65
- 3 Le site de Cacao 68
    - A/ Taux de survie, taux de mortalité et état sanitaire. 69
    - B/ Hauteurs et taux de croissance. 80
        - Tecks 82
        - Bagasses 84
        - Cordias 86
        - Niangons 87
        - Ingas 87
    - C/ Synthèse 88
- 4 Discussion générale 90
    - Effet du contexte pédoclimatique 91
    - La Bagasse 93
    - Le Cordia 102
    - Le Teck 108
    - Le Niangon 110
    - L'Inga 115

1 - Le site de Regina-Toulouri.

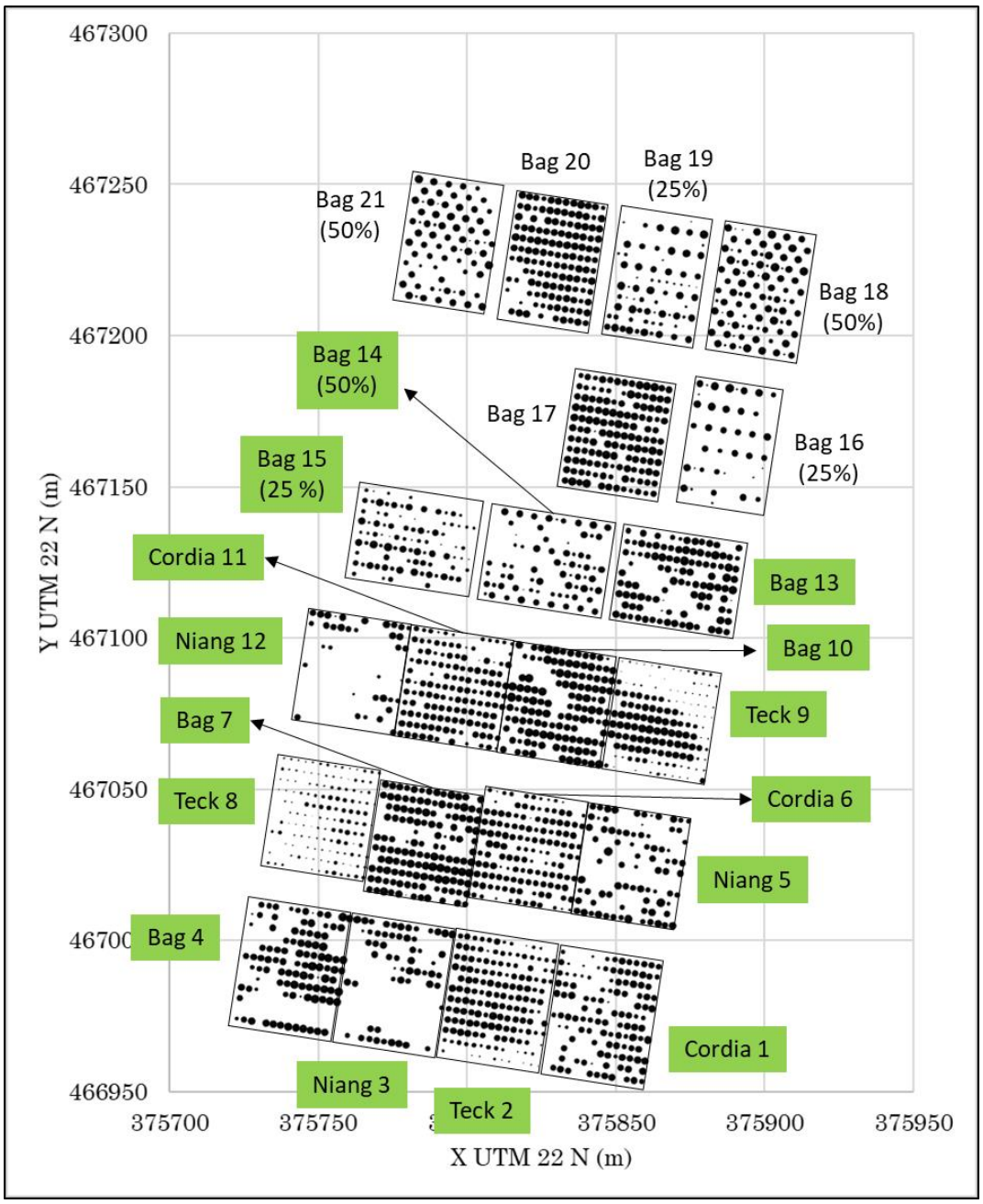


Fig. 1. Survie et hauteur totale des arbres à 50 mois sur la parcelle de Regina. Chaque point représente un arbre planté vivant dont la taille est proportionnelle à la hauteur totale de l'arbre. Chaque intitulé indique le nom vernaculaire de l'espèce et le numéro de la placette. Bag : Bagasse ; Niang : Niangon. Les intitulés en fond vert indiquent la présence du couvert herbacé semé lors de la préparation de la parcelle.

La figure 1 présente la survie et la hauteur totale des arbres sur la parcelle de Regina 50 mois après plantation (01/2018 - 03/2022). Pour rappel, cette parcelle est constituée d'un bloc sud de 12 placettes comparant les 4 espèces forestières plantées avec couvre sol herbacé semé, et d'un bloc nord de 9 placettes plantées soit de bagasses (Bag 100%), soit d'un mélange de Bagasses et d'*Ingas edulis* (Bag

50% = Inga 50% ; Bag 25 % < Inga 75 %). Survie et hauteur totale sont très hétérogènes d'une placette ou d'une espèce à l'autre.

A/ Pourcentage de survie, taux de mortalité et état sanitaire.

Après 50 mois de développement, le pourcentage de survie reste relativement élevé sur la parcelle (66%), mais il est très variable d'une parcelle à l'autre ou d'une espèce à l'autre (Fig. 2). Six placettes ont un pourcentage de survie inférieur à 50%. Les plus hauts pourcentages de survie sont observés chez les Bagasses, puis les Tecks et les Cordias, tandis que les plus bas (< 40%) sont observées chez les Niangons et les Ingas.

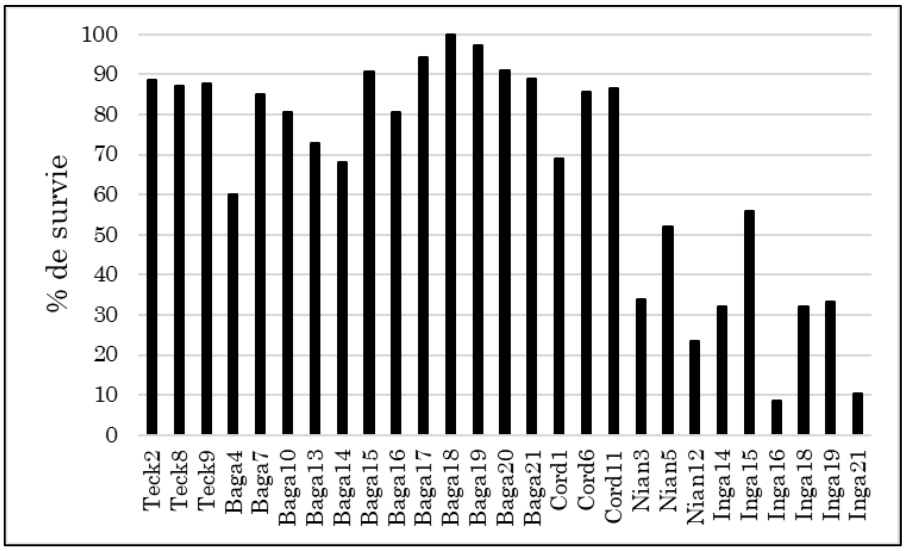


Fig. 2. Survie des arbres par placette à 50 mois sur la parcelle de Regina. Chaque intitulé de placette indique le nom vernaculaire de l'espèce et le numéro de la placette. Baga : Bagasse ; Nian : Niangon ; Cord : Cordia.

La figure 3 détaille l'évolution du taux de mortalité au cours de la période d'étude, ainsi que la pluviométrie qui a vraisemblablement joué un rôle non négligeable dans l'évolution temporelle de cette mortalité. Après plantation (janv 2018), beaucoup de plants sont morts en février 2018 de manière très localisée en présentant les indices manifestes d'un excès d'eau (jaunissement des plants, défeuillaison). Un remplacement en mars 2018 de tous les plants morts explique la diminution des valeurs de mortalité après février 2018. Mais de nombreux plants sont à nouveaux relevés comme morts en juillet 2018. Elément important : sur la période de janvier à juillet 2018, la parcelle a reçu plus de 400mm de pluie par mois, soit 3394mm. Il est utile de rappeler aussi que de novembre 2017 à juin 2018, la surface de la parcelle avait perdu ses capacités d'absorption des eaux de pluies (voir chapitre précédent « Suivi sols ») en raison de la réalisation de travaux relatifs à la préparation de la parcelle tandis que les pluies étaient de retour. Ainsi, certains endroits de la parcelle ont pu être le passage de toutes les eaux de ruissellement provenant des bassins versants en amont et qui n'ont pas été absorbées par le sol. De nombreux trous de plantation, qui sont les seuls endroits de rupture de la couche de surface, ont été souvent inondés durant la grande saison des pluies de 2018.

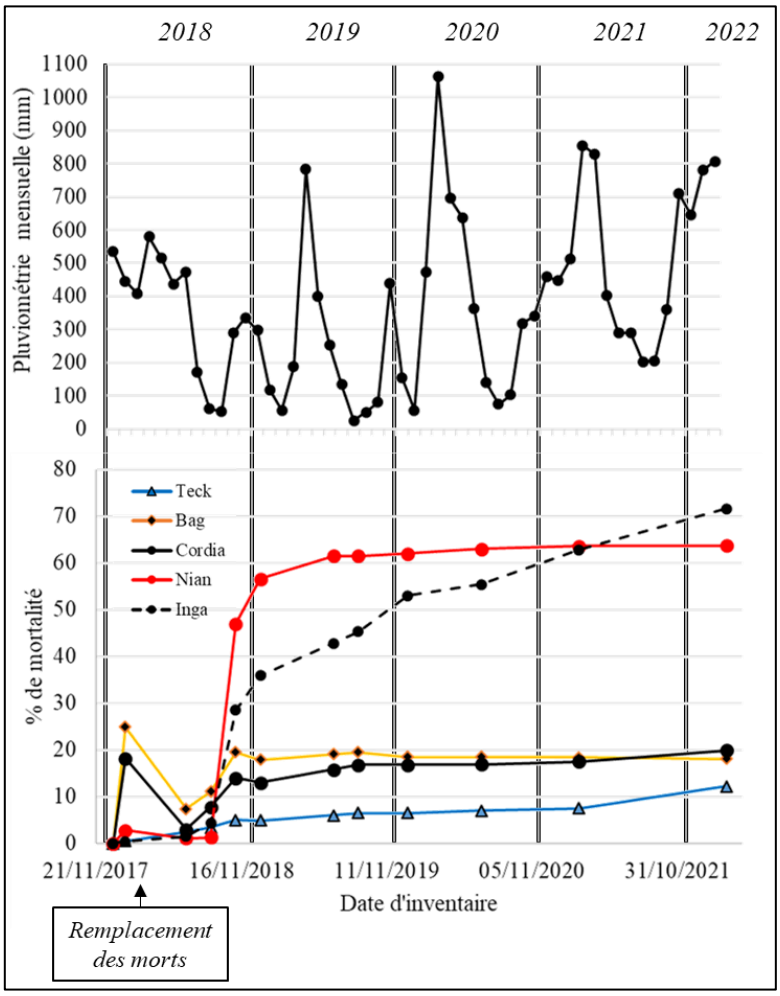


Fig. 3. Pluviométrie mensuelle (en haut) et taux de mortalité par espèce (en bas) sur la parcelle de Regina. Bag : Bagasse ; Nian : Niangon.

Cette grande saison des pluies 2018 a été suivie par une grande saison sèche bien marquée (284 mm de pluie d'aout à octobre 2018). C'est aussi durant et au terme de cette période que la mortalité s'est largement exprimée : chez les Niangons qui ont subi une mortalité dramatique (57% des plants), les Ingas (~ 30% des plants), et enfin les Bagasses et les Cordias pour lesquels, les pertes ont été plus modestes (~ 15%). Ce sont les Tecks qui ont le moins subi. Par la suite, malgré l'alternance de saisons des pluies et de saisons sèches bien marquées, la mortalité est devenue anecdotique pour toutes les espèces (< 0,05% par mois), sauf pour les Ingas qui montrent un taux de mortalité quasiment constant (2,1% par mois) de janvier 2019 à mars 2022 et des effectifs qui déclinent régulièrement. Nous observons aussi une augmentation du taux de mortalité pour les tecks en 2022. En plus de cette variabilité interspécifique et temporelle, il existe une variabilité spatiale importante, observée chez les différentes espèces.

<u>Pour les Bagasses</u>, la mortalité a été importante (24%) juste après la plantation, mais aussi plus tardivement. Elle a pu aussi être très localisée. Ainsi, après le remplacement des plants en mars 2018, la mortalité relevée comme moins importante en juillet 2108, se produit dans les mêmes zones que celles de mortalité

initiale relevée en février 2018. Une situation qui révèle une certaine constance des contraintes (Fig. 4). Plusieurs remarques peuvent être émises.

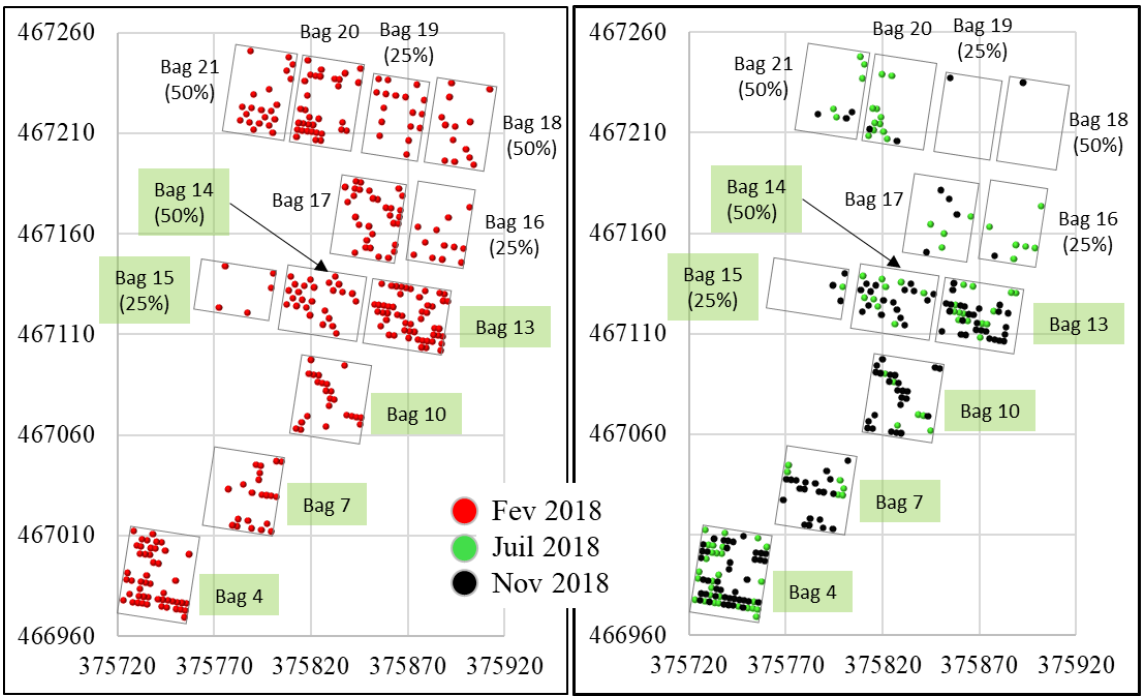


Fig. 4. Mortalité spatiale et temporelle de la Bagasse. Chaque point représente un arbre planté, relevé comme mort à une date d'inventaire donnée (charte de couleur). Les intitulés en fond vert indiquent la présence du couvert herbacé semé. A gauche : mortalité observée juste après plantation ; à droite : mortalité observée après remplacements de mars 2018.

(1) Si la mortalité initiale était, à peu de chose près, similaire dans toutes les placettes en février 2018, elle est restée ultérieurement plus prononcée dans 5 des 6 placettes couvertes de *Stylosanthes guianensis* (4, 7, 10, 13 et 14 ; Fig. 5) et surtout toujours de manière très localisée (Fig. 4) ! Ainsi, il ressort que le couvert herbacé réparti uniformément sur les placettes ne génère pas une contrainte uniformément répartie, mais semble contribuer à accentuer plutôt une contrainte préexistante toujours très localisée.

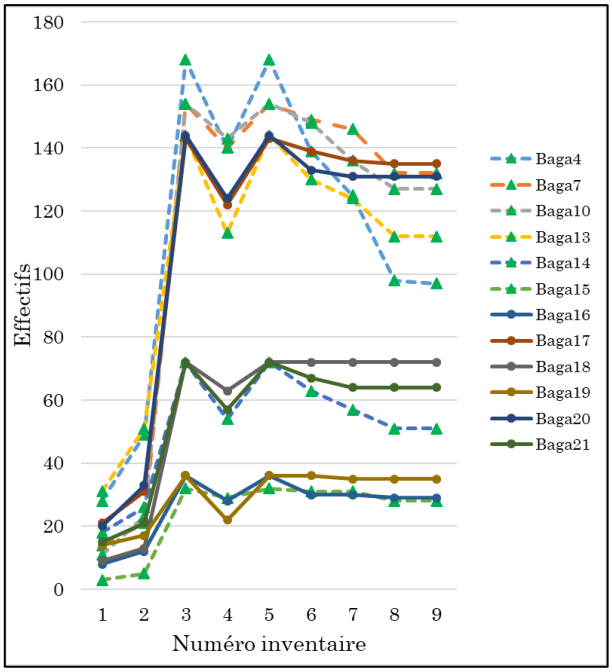


Fig. 5. Evolution des effectifs dans les différentes placettes de Bagasses de la parcelle de Regina. Les courbes en pointillés indiquent les placettes couvertes de Stylosanthes guianensis.

(2) La placette 4 en bas de pente (alt. 50 m) est la plus affectée par la mortalité. C'est aussi une placette qui est traversée par de grandes quantités d'eau de ruissèlement provenant de tout l'amont (Fig. 6). Pour comparaison, la placette 10 située plus haut sur la pente (alt. 58 m) reçoit bien moins d'eau et montre des taux de mortalité bien inférieurs (Fig. 5).

(3) Etonnamment, les placettes 13 et 14 situées haut sur la pente (alt. respectivement 58 et 55 m) montrent des taux de mortalité plus forts que les placettes à proximité (10 et 7, 16 et 17). Ces placettes 13 et 14 sont aussi des placettes qui semblent recevoir de grandes quantités d'eau drainées par un canal de bord de piste (ligne pointillée rouge ; Fig. 6) et qui parviennent aux abords de la placette 13, puis traversent la placette 14 qui reçoit aussi des eaux provenant de plus loin sur la crête. Enfin, la placette 14 matérialise la zone de naissance de la crique (Fig. 6 ; trait bleu sur la carte).

(4) Le coin sud-ouest de la placette Bag 20, comme la partie sud de Bag 21 sont aussi affectée par la mortalité. Ce sont aussi des zones de convergences des eaux de ruissèlement.

(5) La mortalité très localisée dans la placette 10 suit une diagonale qui correspond au tracé d'une ancienne piste de débusquage des bois. Un compactage du sol au cours des années 2000 est suspecté.

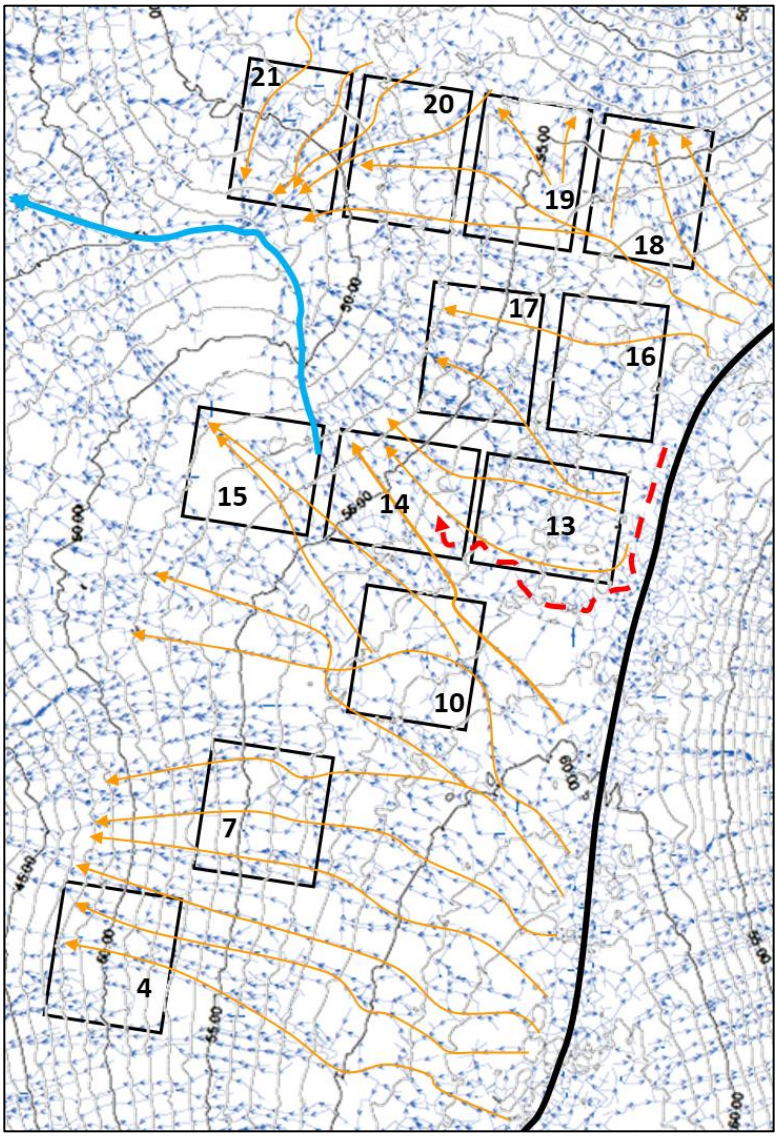


Fig. 6. Situation des placettes de Bagasses et écoulement des eaux de ruissellement sur la parcelle de Regina. Le trait noir épais matérialise la piste d'accès qui marque aussi la ligne de crête. Les lignes grises sont les courbes de niveau. Les lignes bleues indiquent le sens d'écoulement des eaux de ruissellement. Le trait rouge discontinu matérialise le trajet d'eau drainée par un canal de bord de piste. Les lignes orange matérialisent les trajets généraux suivis par les eaux de ruissellement.

Les observations montrent qu'au stade « jeune plant de 20 cm de haut », la bagasse apparait très sensible à l'ennoiement (hydromorphie temporaire) et elle peut en mourir avant même un stress hydrique marqué. La mortalité précoce des bagasses peut être résumée de la manière suivante. (A) La première vague de mortalité (février 2018) des bagasses s'est produite juste après la plantation, au cours d'une période très humide. La préparation de la parcelle (octobre-novembre 2017) a compromis les capacités d'absorption de l'eau de la parcelle à partir de novembre 2017 (percolation : 2cm/h). Ainsi, de grandes quantités d'eau de pluie, non absorbées par le sol, ont ruisselé à la surface du sol, remplissant durablement les trous de plantation. Les emplacements situés dans des endroits moins drainants, mais aussi vraisemblablement impactés par la préparation récente ou par des activités plus anciennes (piste de débusquage) ont été ceux dans lesquels, l'eau a stagné le plus longtemps, dégradant rapidement l'état des bagasses. (B) La seconde vague de mortalité a eu lieu sur les mêmes emplacements, mais de manière plus étalée dans le temps. De mars à juillet, les nouveaux plants placés dans les trous problématiques ont subi des contraintes similaires probablement amoindries par la résorption graduelle du compactage de surface. Cependant cette contrainte par ennoiement n'a pas permis une installation racinaire suffisante essentielle pour mettre les plants à l'abri du stress hydrique en saison sèche. C'est très vraisemblablement une des raisons pour lesquelles l'essentiel des plants « fragilisés » a disparu lors de la première grande saison sèche (octobre-novembre 2018) qui a fait un tri sélectif et a durablement fixé les effectifs de Bagasses.

En ce qui concerne les Niangons, la mortalité a été négligeable entre janvier et juillet 2018 sur les 3 placettes (Fig. 7). En revanche, elle a été dramatique entre septembre et novembre 2018, période de la grande saison sèche. Les placettes les plus touchées sont celles situées en milieu de pente (Niang 3) et bas de pente (Niang 12), tandis que la placette en haut de pente (Niang 5) a subi bien moins de pertes. Cette mortalité dramatique peut aussi être interprétée au travers de l'alternance « trop d'eau – sec ».

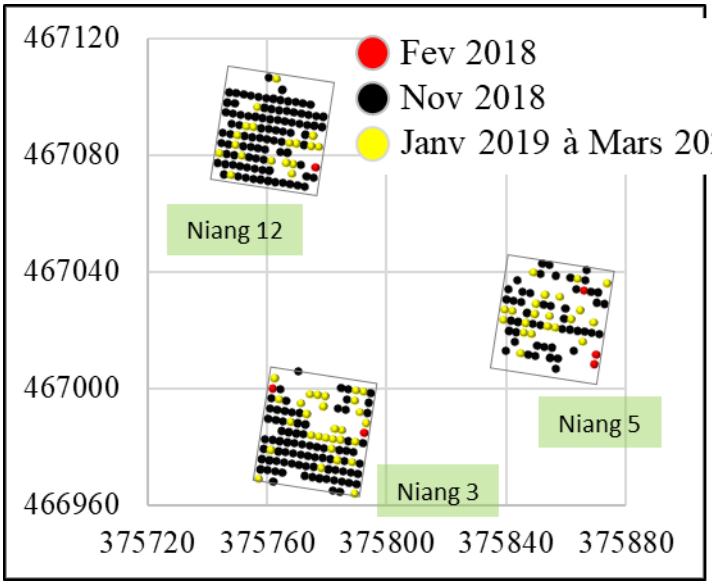


Fig. 7. Mortalité spatiale et temporelle du Niangon. Chaque point représente un arbre planté et relevé comme mort à une date d'inventaire donnée (voir charte de couleur). Les intitulés en fond vert indiquent la présence du couvert herbacé semé lors de la préparation de la parcelle. Les placettes de Niangons n'ont pas fait l'objet de remplacement d'individus.

L'hypothèse retenue est la suivante : de trop grandes quantités d'eau (1) reçues pendant les premiers mois après plantation ont contrarié le développement racinaire de la plupart des Niangons qui n'ont pu que développer un système racinaire trop peu efficient (2) pour subvenir à leurs besoins en eau en grande saison sèche (3) et en présence d'un couvre sol herbacé (4) partageant la même ressource qu'eux, et en sont morts. Cette situation a été aggravée par la pente et vraisemblablement les propriétés du sol (5).

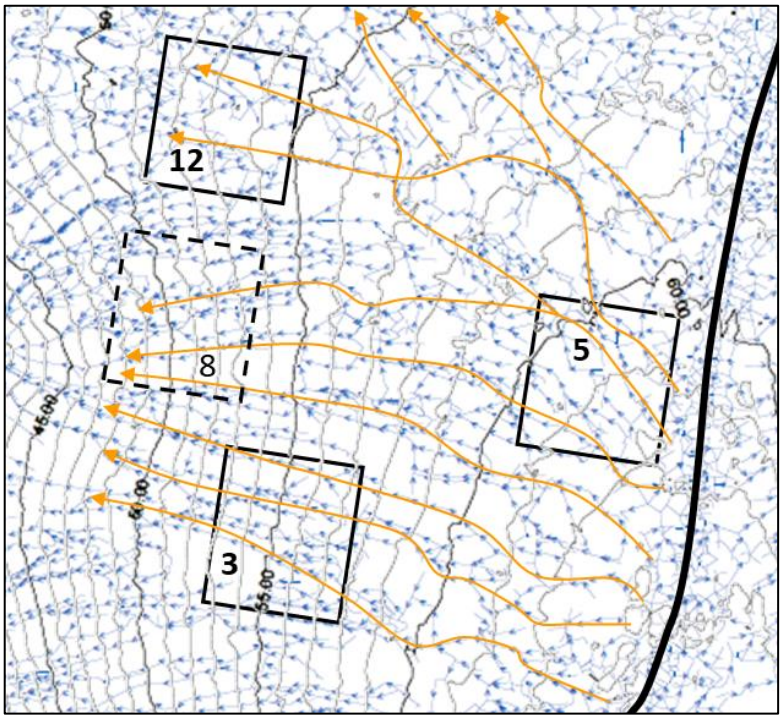


Fig. 8. Situation des 3 placettes de Niangons (3, 5 et 12) et écoulement des eaux de ruissellement sur la parcelle de Regina. Le trait noir épais matérialise la piste d'accès qui marque la ligne de crête. Les lignes grises sont les courbes de niveau (tous les mètres). Les lignes bleues indiquent le sens d'écoulement des eaux. Les lignes oranges matérialisent les trajets généraux suivis par les eaux de ruissellement. La placette 8 a été laissée pour repère : nous y avons relevé la présence d'eau libre dans un trou de sondage à moins de 70 cm de profondeur en mars 2022 (saison des pluies).

En effet, ce sont les placettes situées le plus bas sur la pente qui ont montré les plus forts taux de mortalité entre septembre et novembre 2018 : 60% pour Niang 12 (alt. 53 m), 47% pour Niang 3 (alt. 56 m) et 31% pour Niang 5 (alt. 61 m).

C'est aussi en bas de pente (alt. 51 m), que nous avons observé la présence d'eau libre dans un trou de sondage pédologique à moins de 70 cm de profondeur en mars 2022 (saison des pluies) : signe d'un drainage lent. Ce même jour, nous n'avons jamais relevé d'eau libre lors de nombreux sondages effectués plus haut sur la pente. Cette situation, qui signifie l'existence d'une hydromorphie temporaire au moins en saison des pluies, est connue pour être particulièrement défavorable au développement des racines chez beaucoup d'espèces d'arbres sensibles à ce facteur. Qui plus est, c'est aux plus faibles altitudes que nous avons décrit des sols tachés, indicateur d'hydromorphie temporaire.

La carte précédente (Fig. 8) présente l'écoulement des eaux de ruissellement dans la zone des placettes de Niangons. Ce sont les placettes de bas de pente (Niang 3 et Niang 12) qui sont traversées par les plus grandes quantités d'eau, tandis que Niang 5 située en haut de pente ne reçoit que l'eau des pluies qui tombent sur sa

surface. Il est utile aussi de rappeler que la réalisation de travaux du sol en novembre 2017 ont compacté les couches superficielles du sol (chapitre « sol »), créant des conditions propices à l'ennoiement temporaires des trous de plantation.

Nous avons excavé quelques plants vivants et quelques plants morts afin de contrôler l'état de leurs systèmes racinaires juste après la grande saison sèche de 2018 (Fig. 9). La plupart des individus morts avaient un système racinaire nécrosé, très réduit, superficiel et surtout taché de rouille, un signe que ces arbres ont subi des périodes d'ennoiement (hydromorphie temporaire) de leur système racinaire durant la grande saison des pluies.

Fig. 9. Physionomie de Niangons venant de mourir. Ils sont souvent défeuillés, ou l'ont été avant de mourir (à gauche ; représentation graphique après description intégrale), et ont un système racinaire très réduit, nécrosé et taché de rouille (à droite). © A. de Haldat

En revanche, aucun arbre excavé vivant après cette période sèche 2018 n'avait un système racinaire dégradé (Fig. 10).

Fig. 10. Physionomie d'un Niangon avec un développement correct (à gauche) et un système racinaire indemne (milieu), bien installé comme le montre la représentation graphique après description intégrale à droite). © A. de Haldat

Enfin, c'est en bas de pente que les sols renferment le plus de sables grossiers (> 50%), diminuant d'autant les capacités de rétention en eau du sol durant la période sèche.

Le déroulement des évènements semble avoir été le suivant : au cours de la saison des pluies, les plants qui seront relevés comme morts en novembre 2018, sont ceux qui ont subi des conditions récurrentes d'hydromorphie dues à l'ennoiement des trous de plantations. Ces conditions ont limité l'expansion de leurs systèmes racinaires, particulièrement en profondeur, mais sans compromettre le développement du système aérien et son état sanitaire. En effet, l'humidité et la fertilisation ont permis au système aérien de ces arbres de se développer « normalement » en saison des pluies, en soulignant tout de même que leur dynamique de croissance en hauteur a été inférieure à celle des arbres qui ont survécu (Fig. 11).

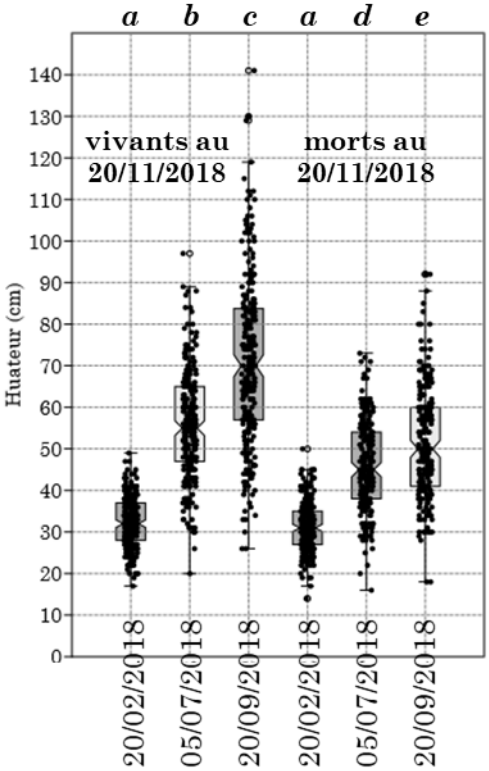


Fig. 11. Croissance en hauteur des Niangons relevés « vivants » ou « morts » au terme de la première grande saison sèche (novembre 2018). Les box plots avec une lettre commune n'ont pas de médianes significativement différentes (test de Kruskal-Wallis).

En revanche, avec l'arrivée de la grande saison sèche et le développement remarquable du couvert herbacé semé (*Stylosanthes guianensis*), ces Niangons enracinés superficiellement, en compétition pour l'acquisition de l'eau, n'ont pas pu gérer le stress hydrique : ils ont perdu toutes leurs feuilles et se sont ensuite desséchés. Ce schéma aggravé par la pente, est aussi valable pour la placette Niang 5 située en sommet de relief, mais dans une moindre mesure car (i) cette placette a été bien moins exposée aux eaux de ruissellement (Fig. 8) et (ii) ses sols contiennent bien moins de sables grossiers (< 40%) qui ont une plus grande réserve en eau en saison sèche. Ainsi, plus d'arbres ont probablement pu installer correctement leur système racinaire, malgré la présence de *Stylosanthes guianensis* et ils ont pu bénéficier d'une plus grande réserve en eau. Ici, nous faisons l'hypothèse que si un élément de cette scène avait été absent, soit le compactage de surface, soit le couvert herbacé, soit la saison des pluies (moins forte), la mortalité des Niangons n'aurait vraisemblablement pas été aussi importante à Regina.

<u>Pour les Cordias</u>, la mortalité est plutôt modérée sur le site de Regina. C'est la placette Cordia 1 située en crête qui se démarque sensiblement des placettes Cordia 6 et 11 par une mortalité un peu plus importante. Par ailleurs, la mortalité

semble un peu plus localisée dans la placette Cordia 1 que dans les 2 autres placettes où elle est diffuse d'un inventaire à l'autre (Fig. 12). Le fait que la placette Cordia 1 soit la moins traversée par les eaux de ruissellement (Fig. 13) ne suggère pas que l'ennoiement temporaire soit le facteur premier induisant la mortalité. Cette hypothèse est soutenue par le fait que les 2 autres placettes Cordia 6 et 11 situées dans la pente et plus exposées à l'ennoiement, montrent une mortalité bien moindre. La situation de cette placette Cordia 1 suggère plutôt une surface qui aurait été impactée soit par un passif ancien (exploitation forestière), soit plus récent (défriche de la parcelle), sans exclure bien entendu un contexte pédologique particulier et très localisé.

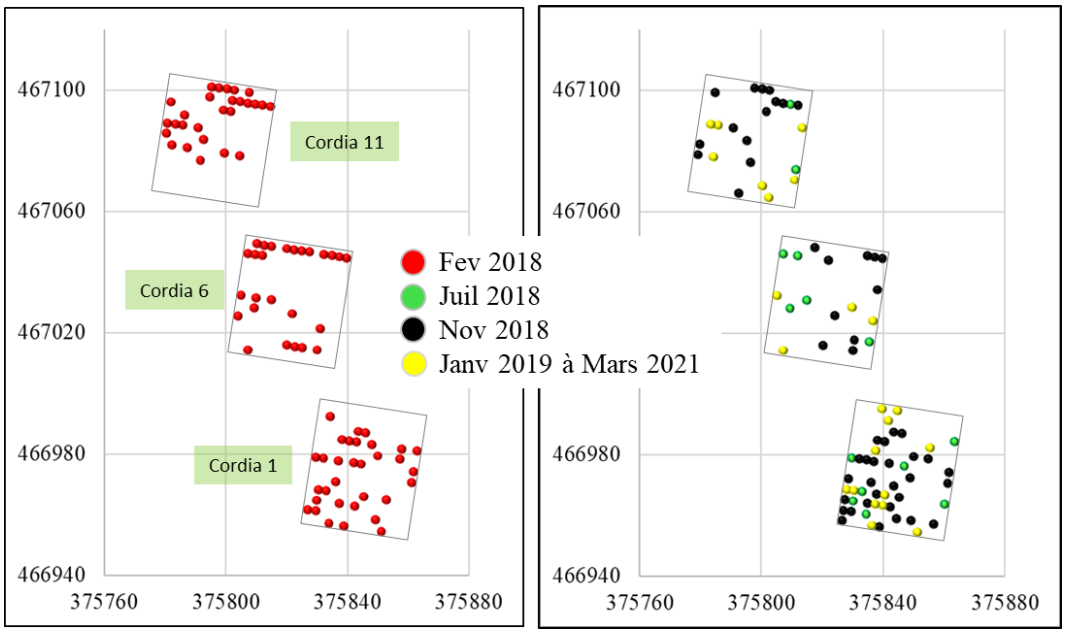


Fig. 12. Mortalité spatiale et temporelle du Cordia. Chaque point représente un arbre planté et relevé comme mort à une date d'inventaire donnée (voir charte de couleur). Les intitulés en fond vert indiquent la présence du couvert herbacé semé lors de la préparation de la parcelle. A gauche : mortalité observée après plantation ; à droite : mortalité observée après les remplacements de mars 2018.

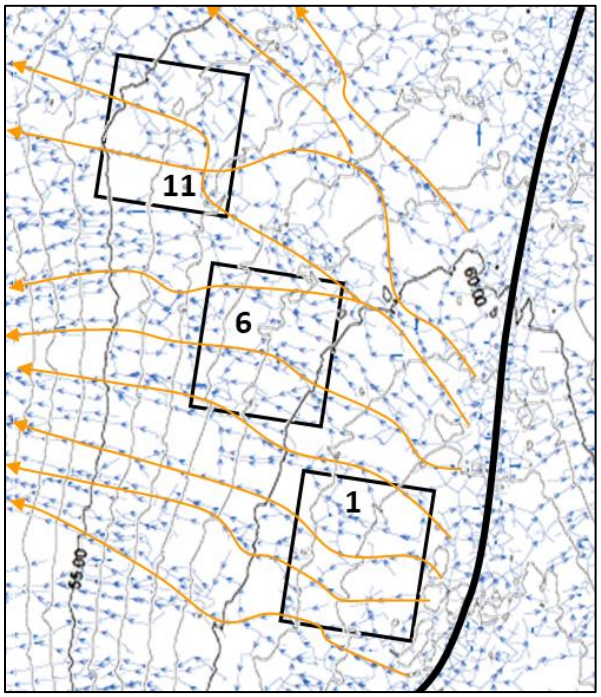


Fig. 13. Situation des 3 placettes de Cordias (1, 6 et 1) et écoulement des eaux de ruissellement sur la parcelle de Regina. Le trait noir épais matérialise la piste d'accès qui marque la ligne de crête. Les lignes grises sont les courbes de niveau (tous les mètres). Les lignes bleues indiquent le sens d'écoulement des eaux. Les lignes oranges matérialisent les trajets généraux suivis par les eaux de ruissellement.

Pour *Inga edulis*, la mortalité a commencé de manière conséquente au cours et à la fin de la grande saison sèche 2018 (Fig. 3). A la différence de la Bagasse, elle s'exprime de manière dispersée d'un inventaire à l'autre (Fig. 14). Par ailleurs, ce n'est pas sur des placettes les moins exposées à l'ennoiement (exemple de Bag 21) que la mortalité a été la moins forte. De la même manière, l'absence de *Stylosanthes guianensis* n'est pas associée avec une moindre mortalité ou une plus forte mortalité.

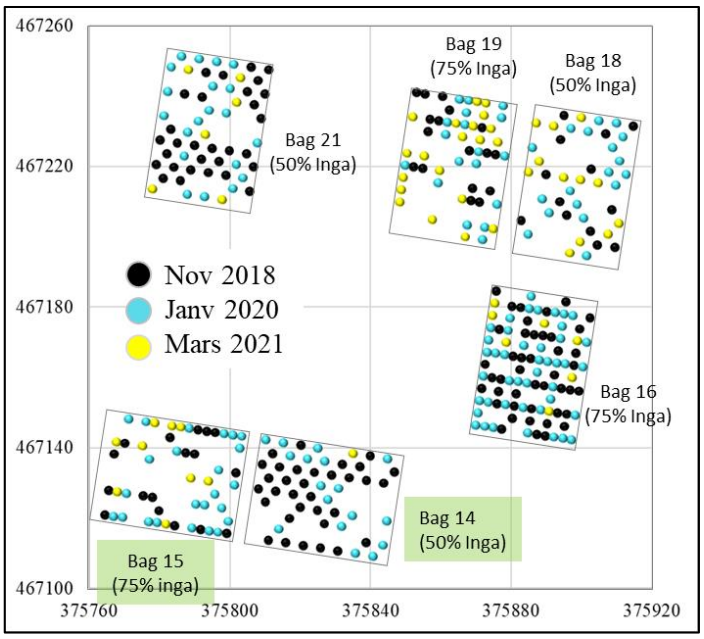


Fig. 14. Mortalité spatiale et temporelle d'Inga edulis. Chaque point représente un arbre planté et relevé comme mort à une date d'inventaire donnée (voir charte de couleur). Les intitulés en fond vert indiquent la présence du couvert herbacé semé lors de la préparation de la parcelle. Les Ingas n'ont pas fait l'objet de remplacement d'individus car leur mortalité était faible après plantation.

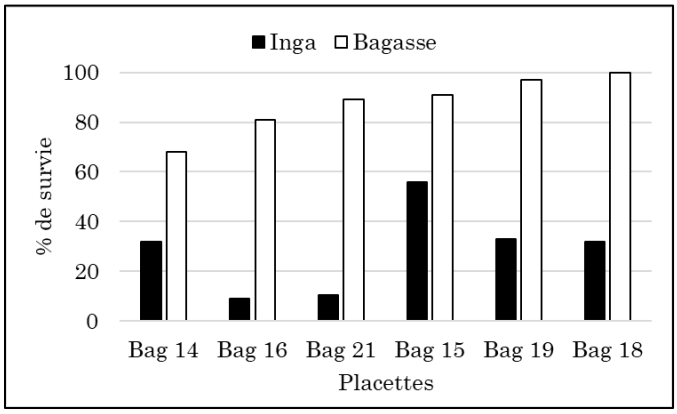


Fig. 15. Comparaison des pourcentages de survie des bagasses et des Ingas dans les 6 parcelles mixtes

Enfin, la figure 15 montre qu'il n'y a pas de correspondance évidente entre les taux de survie des Ingas et ceux des bagasses dans les placettes mixtes « Bagasses-Ingas ». Les différents inventaires ont permis d'observer que les Ingas étaient très souvent jaunes, et chétifs, les beaux individus bien verts étant peu fréquents. **Il est utile ici de rappeler que cette espèce est la seule qui a été plantée sans fertilisation, que ce soit à la trouaison (fertilisation de fond) ou bien à la plantation (fertilisation de surface).** Nous avions opté pour cet itinéraire en suivant les recommandations d'un partenaire, l'abondance d'azote pouvant inhiber la nodulation et la fixation d'azote. En revanche, les Ingas ont bénéficié d'un chaulage à la dolomie phosphatée réalisé sur l'ensemble de la parcelle.

Comment interpréter la faillite de cette espèce sur cette parcelle de Regina quand 3 des 4 autres espèces plantées se sont correctement installées ? Cette faillite peut-elle avoir pour origine l'état médiocre des plants qui paraissaient chétifs à la

plantation ? Ou bien faut-il considérer plutôt l'absence de fertilisation à la plantation ? Sans écarter aucune hypothèse, l'absence de fertilisation a pu peser lourd sur le devenir des plants. En effet, nous émettons l'hypothèse que les sols de la parcelle de Regina n'ont pas satisfait les besoins en Phosphore (P) des Ingas. En effet, les dosages chimiques (méthode de Olsen) n'ont pas permis de détecter de P disponible (<LD ; voir chapitre « sol ») dans les sols de surface 0-30 cm de Regina. Il est utile aussi de rappeler que les sols de la parcelle de Regina sont relativement riches en argiles (35 à 40% ; voir chapitre « sol »). Dans ces sols assez argileux, le P disponible pourrait bien être très mobilisé par l'oxyde de Fer (Ref), ce qui n'est pas le cas dans l'Acrisols bien plus sableux de Paracou (voir chapitre « sol »).

Le principal rôle du P à l'intérieur de la plante est lié au stockage et transfert d'énergie (ATP), à la formation de composés structurels (nucléotides, acides nucléiques, coenzymes, phospholipides, etc…) intervenant notamment dans la croissance des racines. C'est un stimulateur de la croissance racinaire. Les Ingas juste plantés ont pu souffrir d'un réel manque de phosphore induisant d'un développement racinaire limité, n'allant guère plus profond que le trou de plantation (0-30 cm), comme nous l'avons vu pour le Niangon (Fig. 9 et 10) et le Teck (Fig. 28). Il faut rappeler aussi qu'à Regina, la couche de surface renferme une grande quantité d'éléments grossiers (EG ; 25 à 40% du volume total de sol, voir « chapitre sol »). Ces EG, sous la forme de pisolithes de cuirasses, constituent un obstacle physique non négligeable à la progression des racines. Mais surtout, ils réduisent d'autant les réserves en eau du sol de surface et contribuent à générer de conditions sévères de stress hydrique en grande saison sèche. Ainsi, les jeunes végétaux, issus de graines ou bien plantés petits, qui ne sont pas parvenus à traverser cette couche d'EG durant la saison humide, qui n'ont pas atteint des couches de sols plus profondes renfermant bien moins d'EG, et donc plus humides avant l'arrivée de la grande saison sèche, seront soumis à un stress hydrique sévère qui pourra les faire mourir. Le retour des pluies, conditions plus propices à la croissance, ne changera rien aux conditions initiales. Le cycle du Phosphore est assez complexe et les entrées au sol sont dues principalement aux apports minéraux et organiques et la déposition atmosphérique est négligeable. Sans apport de phosphore et toujours en présence des pisolithes, les Ingas ne trouvent jamais de conditions propices à leur développement et disparaissent de la parcelle à un rythme régulier. L'inaccessibilité du phosphore et la présence de cette couche de pisolithes peuvent constituer un début d'explication (1) à l'échec de l'installation de cette espèce plantée n'ayant pas reçu de fertilisant à la plantation (voir « chapitre 5 »), mais aussi (2) à l'installation lente du recru natif sur cette parcelle de Regina. En effet, l'entretien de cette parcelle, qui a été essentiellement manuel, n'a jamais posé de problèmes en raison de sa lenteur (voir « chapitre 3 »). Ainsi, il ressort d'une manière générale, que sans fertilisation de fond à la plantation, cette espèce ne parvient pas à s'installer dans les conditions pédoclimatiques de Regina.

Pour le Teck, cette espèce qui a été plantée dans des conditions similaires à celles des autres espèces, est l'espèce la plus résistante quelles que soient les conditions puisque la mortalité est négligeable dans les 3 placettes qui occupent pourtant des

situations très diverses. Toutefois, une augmentation du taux de mortalité a été notée en mars 2022 (Fig. 3).

B/ Hauteurs, diamètres et taux de croissance.

Comment étaient les arbres avant de mourir ? C'est une question rarement posée. Ce sont plutôt des petits arbres qui meurent sur la parcelle avant d'avoir atteint un mètre de haut : des arbres qui ne sont pas parvenus à s'installer. C'est le Teck qui montre les plants morts les plus grands (Fig. 16) bien que la mortalité soit très faible chez cette espèce. Après une période 2021 sans morts (arbres vivants en 2020 ; Fig. 16), la mortalité repart en 2022 avec des arbres atteignant 5 m et plus (arbres encore vivants en 2021). Il y a aussi la Bagasse en 2020 avec 2 arbres dépassant 5 mètres, mais cela reste anecdotique.

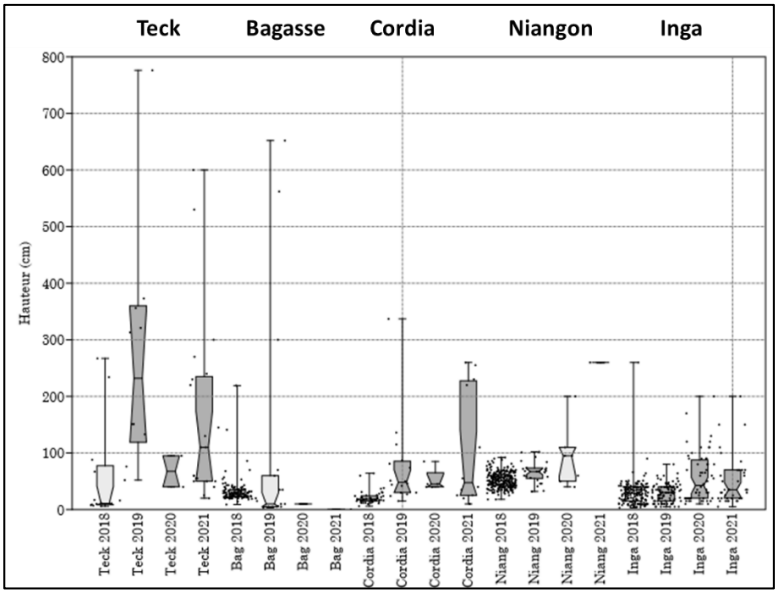


Fig. 16. Hauteur des arbres relevés chaque année comme disparus à différents inventaires pour les 5 espèces plantées sur le dispositif de Regina. Bag : Bagasse ; Niang : Niangon. Chaque point indique la hauteur d'un arbre mesuré lors de l'inventaire précédant celui où il sera observé comme étant mort.

Nous avons dressé un état sanitaire des arbres à 50 mois. La figure 17 présente la répartition des arbres sains (bleu), en souffrance (orange) ou dépérissant (rouge) dans la parcelle de Regina. Les arbres dépérissant sont des arbres exprimant de la mortalité au niveau de la partie sommitale de leur axe principal et souvent l'apparition de rejets à un niveau bas sur ce même axe. Le résultat est parfois une diminution nette de la hauteur totale de l'arbre. Ce sont dans les placeaux de tecks que les arbres dépérissant sont les plus nombreux, tandis qu'ils sont peu fréquents chez les autres espèces. Ce dépérissement affecte tous les tecks d'une même zone sans distinction clonale, suggérant des contraintes imposées par le sol pour tous. Cette figure 16 mettant l'accent sur le Teck ne doit pas masquer d'autres éléments : (1) les arbres ayant pu être dépérissant sont déjà morts chez les autres espèces (Bagasses, Cordias), ou bien sans avoir eu le temps de l'être comme cela a été le cas chez les Niangons ; (2) passée la phase de mortalité, les arbres survivants sont installés durablement et se développent correctement ; (3) le teck a une très grande capacité à se maintenir dans des conditions contraignantes sans mourir, mais il peut alors exprimer des signes évidents de stress.

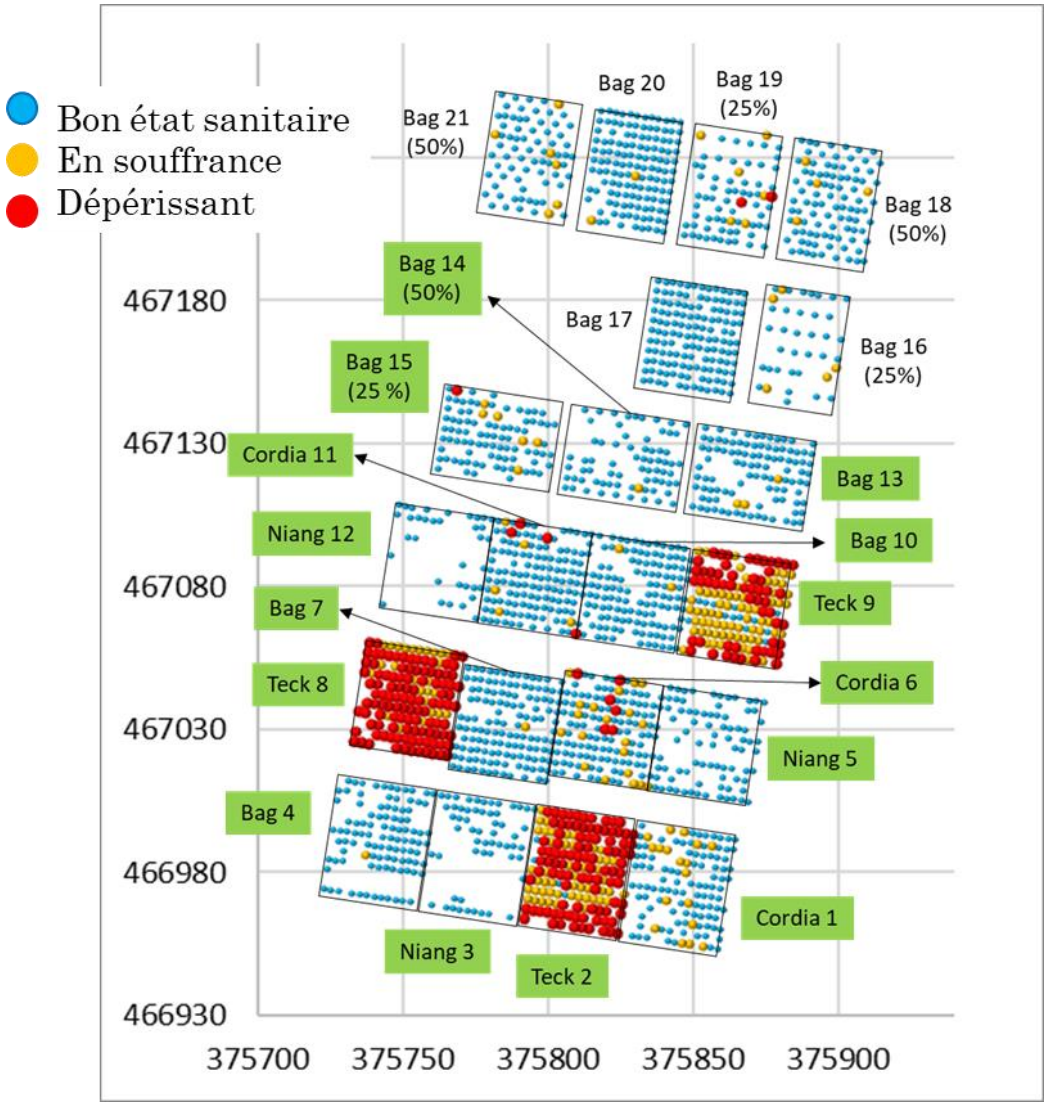


Fig. 17. Répartition des arbres sains (bleu), en souffrance (orange) ou dépérissant (rouge) dans la parcelle de Regina à 50 mois. Chaque point représente un arbre vivant. Les vides sont laissés par des arbres morts.

Le dernier inventaire à 50 mois révèle aussi une forte hétérogénéité de hauteur (Fig. 18) à l'échelle de la parcelle ou de la placette. Au niveau spécifique, ce sont les bagasses qui présentent les hauteurs moyennes les plus importantes, (comprises entre 800 cm et 950 cm) et les coefficients de variation (CV) les plus bas (28%±4% ; Fig. 19). Elle apparait ainsi comme l'espèce la plus homogène et qui se comporte le mieux. Puis viennent les Niangons (~ 900 cm ; CV : 38%±7%) et les Cordias (~ 500 cm ; CV : 38%±2%). Les Tecks ont des moyennes très variables, comprises entre 120 cm et 650 cm et les CV les plus importants (73%±22%). C'est l'espèce qui a le développement le plus variable. Enfin, les Ingas sont les plus petits arbres du dispositif avec une hauteur moyenne comprise entre 100 et 250 cm et des CV assez hauts (54%±15%).

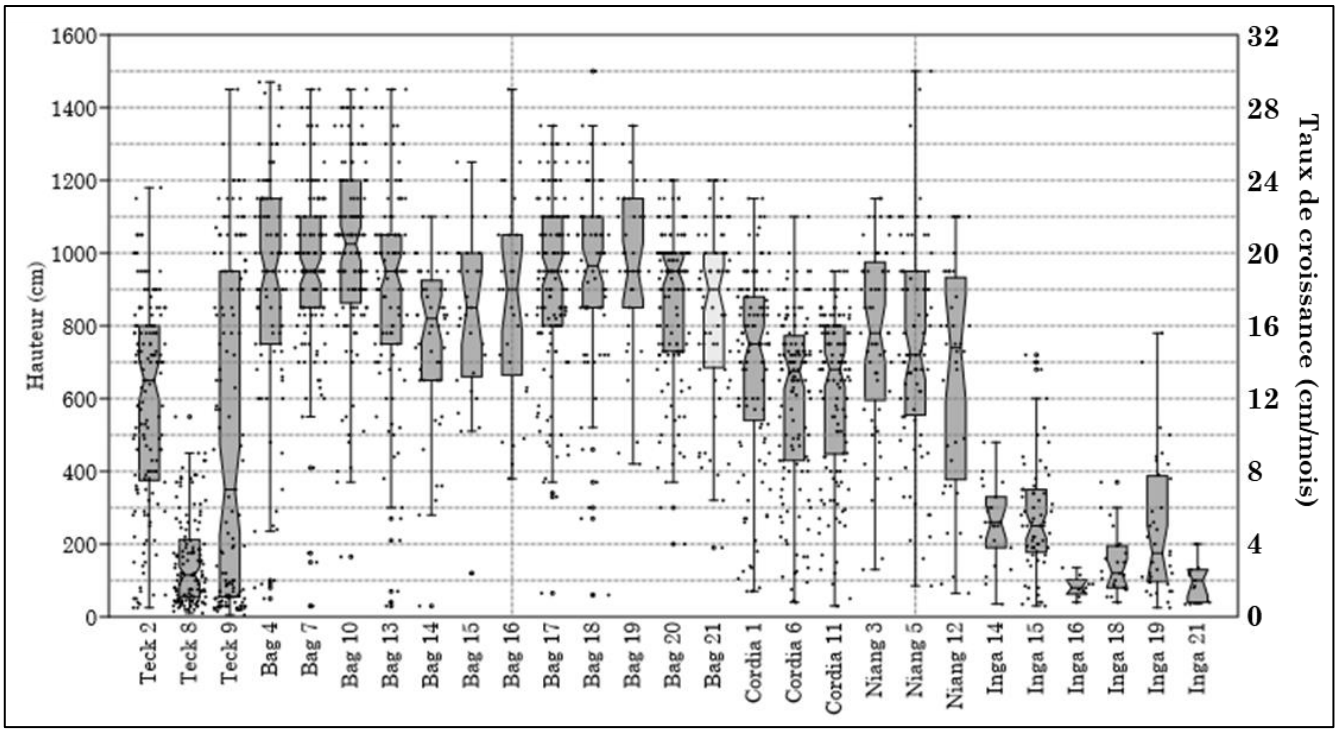


Fig. 18. Box plots de la hauteur totale (cm) des arbres à 50 mois de développement après plantation pour les 5 espèces dans les placettes de la parcelle de Regina. En abscisse, chaque intitulé indique le nom vernaculaire ainsi que le numéro de la placette. Bag : Bagasse ; Niang : Niangon.

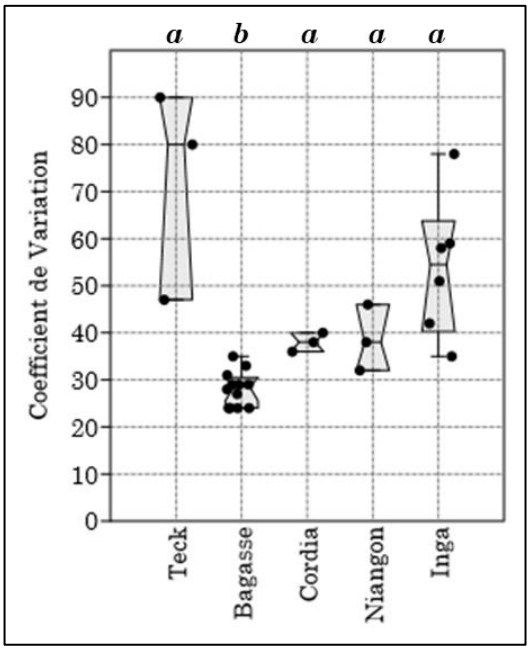


Fig. 19. Coefficients de variation de la hauteur totale des arbres à 50 mois de développement après plantation pour les 5 espèces dans les placettes de la parcelle de Regina. Chaque point représente une placette. Les box plots avec la même lettre n'ont pas leurs médianes significativement différentes.

Pour les Bagasses, natives de Guyane, passée la crise de la plantation et le passage de la première grande saison sèche, elles ont exprimé des dynamiques de croissance en hauteur importantes. L'examen des taux de croissance initiaux, puis des taux de croissance finaux permettent d'isoler 5 groupes de placettes (Fig. 20) et d'établir des comparaisons entre les différentes situations imposées par le site.

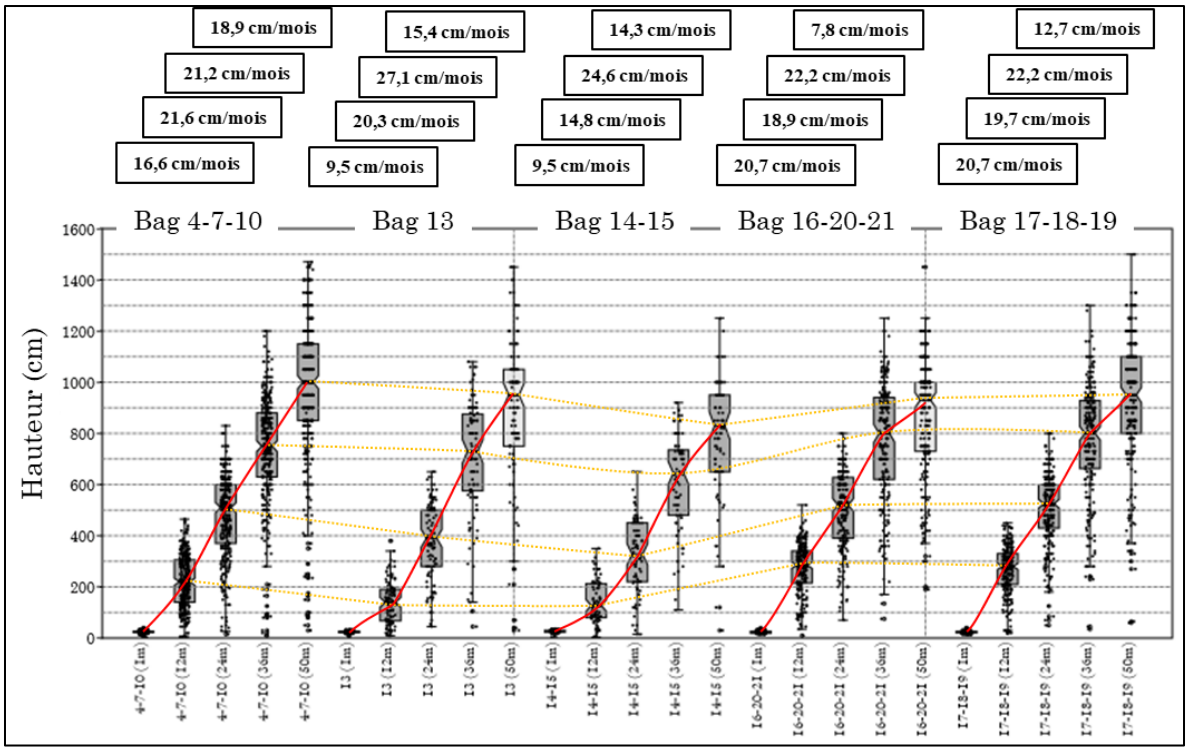


Fig. 20. Box plots de la hauteur totale des Bagasses sur les 12 placettes plantées (Bag 4, 7, 10, 13 à 21) à différentes dates d'inventaire (1, 12, 24, 36 et 50 mois ; respectivement 1m, 12m, 24m, 36m, 50m). Les placeaux 4 à 15 sont avec couvert herbacé de S. guianensis.

C'est dans les placeaux sans couvert herbacé (Bag 16 à 21) que les taux de croissance des 18 premiers mois de développement ont été les plus importants (Fig. 20). Ainsi, la présence de *S. guianensis*, bien installé dès juillet 2018, a imposé de manière notable une contrainte et une compétition pour l'eau aux arbres au cours de la première année de développement dans les placettes recouverte de *S. guianensis* : les arbres marquent le pas en fin de grande saison sèche (Fig. 21), ce qui n'est pas le cas dans les placettes sans couvert herbacé.

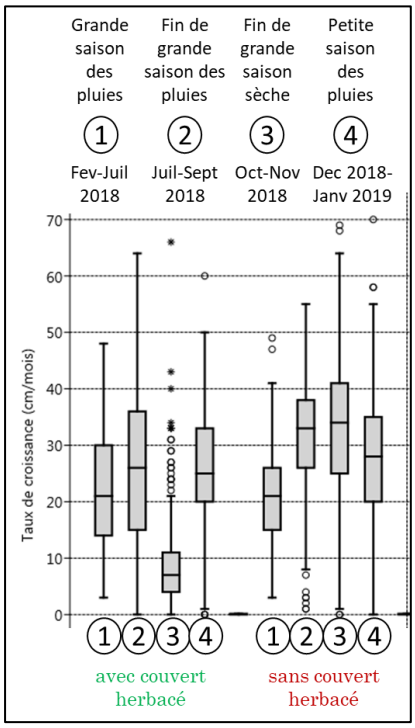


Fig. 21. Comparaison des taux successifs de croissance en hauteur (cm/mois) pour des Bagasses avec ou sans couvert herbacé de la parcelle de Regina au cours de la première année de développement.

En revanche, après 18 mois, la comparaison entre le groupe « 4-7-10-13 » (avec couvre-sol) et le groupe « 16 à 21 » (sans couvre sol) montre qu'il n'y a plus de différence de taux de croissance entre ces 2 groupes. **La présence d'un couvert herbacé important semble avoir cessé d'être pénalisante pour ce qui concerne la croissance en hauteur des bagasses**. Les derniers inventaires réalisés ont permis d'observer que les bagasses bien installés expriment toujours

une croissance en hauteur active, même durant la grande saison sèche. L'atteinte de profondeurs consistantes par les racines des bagasses, mettant les arbres à l'abri du stress hydrique, est une hypothèse envisagée et pertinente.

Parmi les parcelles avec couvre sol herbacé (Fig. 20), ce sont les placeaux 14 et 15 qui ont exprimé les plus faibles taux de croissance au cours des 18 premiers mois. Ce sont aussi des placeaux situé dans la zone de naissance de la petite crique et qui sont traversés par des quantités d'eau de ruissellement vraisemblablement importantes. Le placeau 13 est dans une situation intermédiaire entre le groupe 4-7-10 et le groupe 14-15.

Au-delà de 18 mois, les arbres des placeaux 13, 14 et 15 connaissent une augmentation significative de leurs taux de croissance. Sans parler de rattrapage, car le retard de hauteur atteinte est pris, l'expression de taux de croissance élevés dans cette zone visiblement contraignante est révélatrice du caractère résilient de la bagasse. Ici encore, l'atteinte de profondeurs consistantes par les racines des bagasses est une hypothèse envisagée.

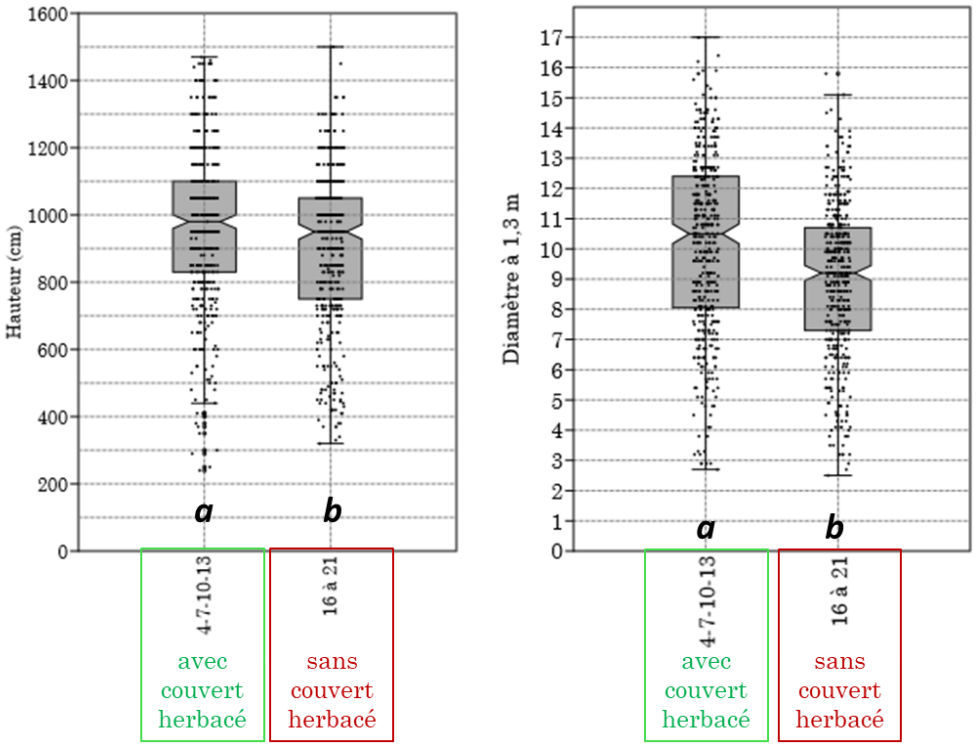


Fig. 22. Box plots de la hauteur totale et du diamètre à 1m30 du tronc des Bagasses à 50 mois sur des placettes plantées avec ou sans couvert herbacé (4-7-10-13 versus 16 à 21). Les box plots ayant la même lettre n'ont pas de médianes significativement différentes au seuil de 5% (Mann-Whitney test).

En excluant les placeaux sous influence de la crique (Bag 14 et Bag 15), les arbres âgés de 50 mois et recouvert d'un couvert herbacé de *S. guianensis* sont sensiblement plus hauts et ont des troncs significativement plus épais que les arbres des placeaux sans *S. guianensis* (Fig. 22). C'est un aspect nouveau car nous avions souligné auparavant que la présence de *S. Guianensis* pouvait significativement pénaliser la croissance en hauteur au cours de la première année

de développement. La présence de *S. guianensis* pourrait-elle expliquer cette différence ? Les placeaux Bag 4 à Bag 13 regroupent des situations topographiques (altitude, pente) et pédologiques (% de sable grossiers ou d'argiles) aussi hétérogènes que celles des placeaux Bag 16 à Bag 21. Aucun de ces paramètres de permet d'expliquer cette différence significative de diamètre entre ces 2 ensembles. Nous ne pouvons pas exclure que la présence de *S. guianensis* ait finalement un effet bénéfique sur le développement des arbres. En effet, la présence du couvert dense de *S. Guianensis* a bien pu induire un enracinement plus profond des bagasses comme cela a été observé sur des plantations associant Noyers et graminées (Cardinael et al., 2015). Un enracinement plus profond est un gage de meilleur alimentation en eau. Mais le rôle joué par le couvert herbacé sur la préservation du sol (érosion, température), la régulation dans le cycle de l'eau (absorption, évaporation), mais aussi l'apport dans le système d'azote atmosphérique par fixation aura aussi pu être déterminant. Une analyse foliaire des isotopes de l'azote a en effet montré que les valeurs du ratio $^{15}N/^{14}N$ dans les feuilles des Bagasses poussant avec *S. guianensis* présentaient un spectre pour l'azote qui se rapprochait beaucoup des valeurs du ratio $^{15}N/^{14}N$ observé dans les feuilles de *S. guianensis* (voir paragraphe suivant).

La hauteur ne saurait être considérée sans sa relation au diamètre du tronc mesuré à 1m30 (Fig. 23 et 24). Les 2 graphes suivants montre la relation entre hauteur et diamètre au cours du développement des arbres avec ou sans *S. guianensis*. Bien que les bagasses croissant avec *S. Guianensis* soient un peu plus développées que celles sans *S. Guianensis*, les 2 relations ne sont pas significativement différentes. Dans les 2 cas, les bagasses atteignant le diamètre moyen de 10 cm et ont une hauteur moyenne de 10 m.

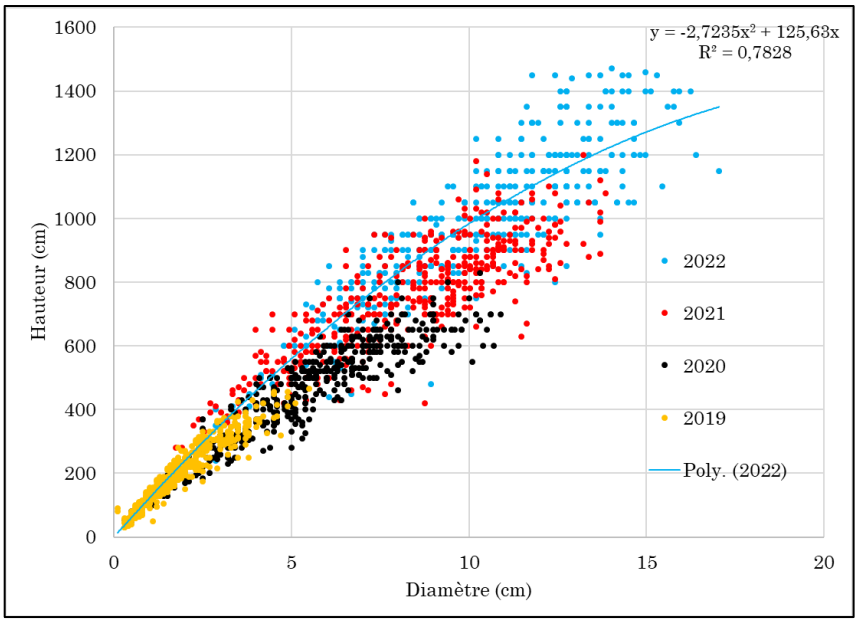


Fig. 23. Relation entre hauteur des arbre et diamètre à 1m30 au cours du développement des Bagasses des placettes Bag 4 à Bag 13 avec couvert de S. guianensis.

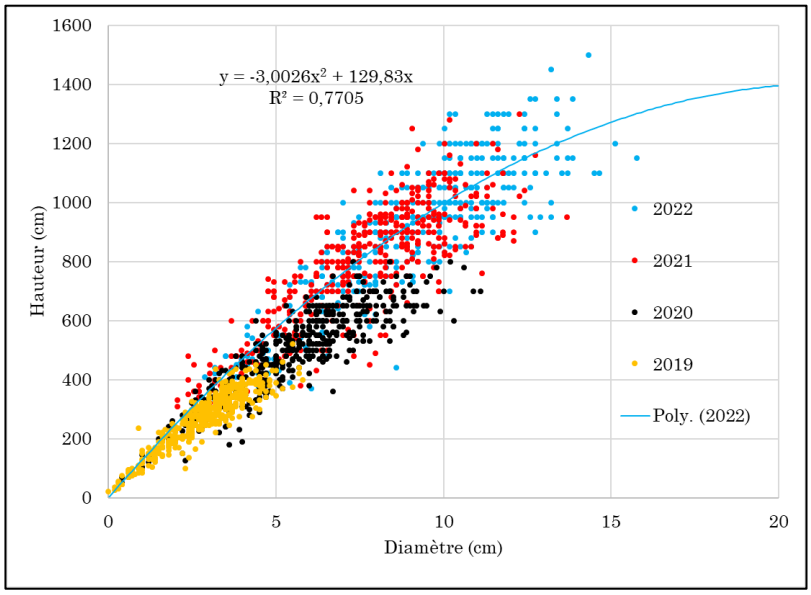


Fig. 24. Relation entre hauteur des arbre et diamètre à 1m30 au cours du développement des Bagasses des placettes Bag 16 à Bag 21 sans couvert de S. guianensis.

<u>Pour les tecks</u>, c'est sur le placeau Teck 2 situé en haut de versant, que les arbres ont pu exprimer les taux de croissance les plus hauts depuis la plantation (Fig. 25) : jusqu'à 4 m/an ! Cependant, ces taux ont clairement diminué depuis 2 ans et les arbres ont perdu de la hauteur à la suite du dessèchement récent des parties les plus hautes.

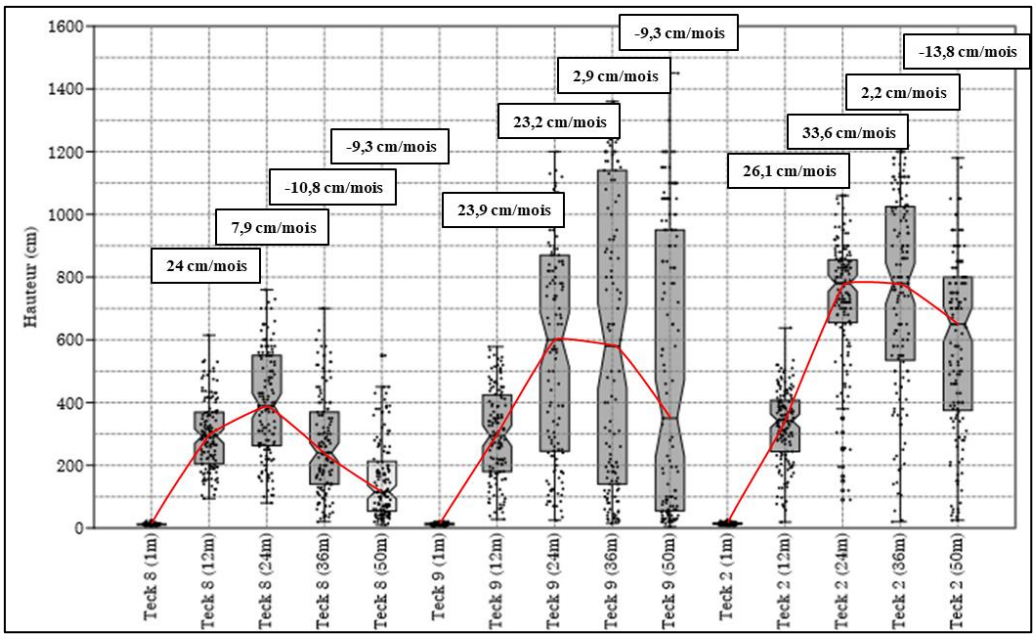


Fig. 25. Box plots de la hauteur totale des tecks sur les 3 placettes plantées (Teck 2, Teck 8 et teck 9) à différentes dates d'inventaire (à 1, 12, 24, 36 et 50 mois ; respectivement 1m, 12m, 24m, 36m, 50m). Les valeurs de taux de croissance annuels (cm/an) présentées dans les encadrés, sont calculés à partir des valeurs moyennes calculée pour chaque placette et pour chaque période de croissance achevée par un nouvel inventaire.

Ce phénomène est aussi observé pour le placeau Teck 8 situé en milieu de versant dès la fin de la deuxième année de croissance. Dans ce placeau en bas de pente, la croissance en hauteur est arrêtée depuis 30 mois et de plus en plus d'arbres dépérissent tandis que de petits rameaux apparaissent à un niveau bas. Ce processus de dépérissement est aussi observé depuis plusieurs mois sur la périphérie du placeau Teck 9. En revanche, sur la partie centrale et légèrement surélevée de ce placeau, les arbres ont pu exprimer un développement optimal avant de connaitre aussi un arrêt de la croissance en hauteur au cours de la 3ème année. Sur la placette 2, mais aussi au centre de la placette 9, l'état sanitaire des arbres s'est considérablement dégradé après 50 mois de développement malgré une très forte croissance dans les 2 premières années après plantation. La figure 26 présente la progression temporelle du dépérissement dans les différentes placettes : très peu d'entre eux présentent un état sanitaire satisfaisant en mars 2022.

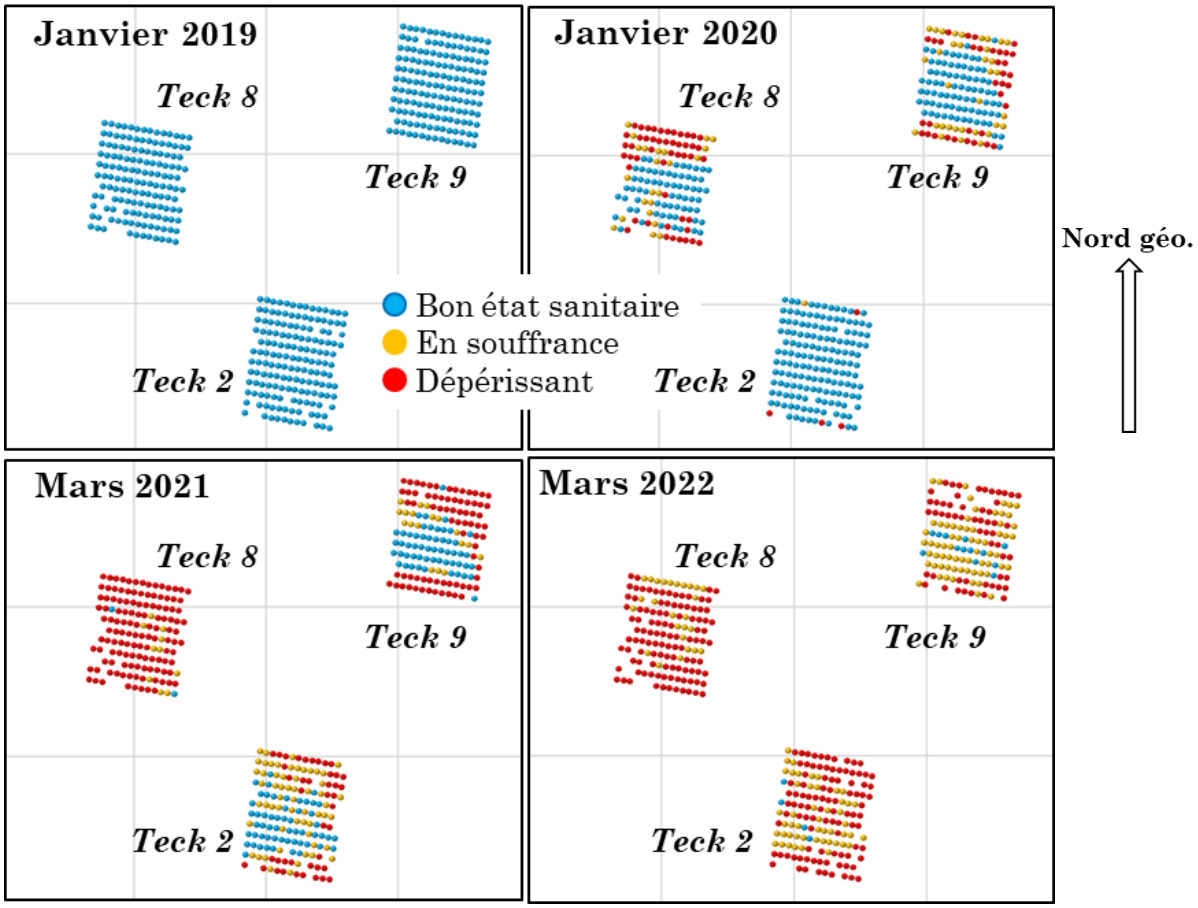


Fig. 26. Evolution au cours du temps de la répartition des arbres sains (bleu), en souffrance (orange) ou dépérissant dans les placeaux de tecks de la parcelle de Regina. Chaque point représente un arbre vivant. Les vides sont laissés par des arbres morts.

La situation observée pour le Teck amène à formuler plusieurs hypothèses. De la même manière que pour la Bagasse, la compaction du sol, les aspects hydrauliques

pouvant impacter la croissance racinaire sont envisagés. La carte suivante (Fig. 27) dresse la situation topographique des 3 placettes de Tecks.

La placette 8 atteint d'un dépérissement précoce est située bas sur la pente. C'est aussi celle qui reçoit beaucoup d'eau de ruissèlement venu de l'amont. D'ailleurs, nous y avons relevé la présence d'eau libre dans un trou de sondage à moins de 70 cm de profondeur en mars 2022 (saison des pluies), ce qui n'a jamais été le cas dans les 2 autres placettes sondées le même jour.

La placette 9 située sur la crête borde une petite dépression au nord souvent inondée par l'arrivée d'eaux drainées par un canal (ligne rouge discontinue) longeant la piste d'accès : l'hydromorphie a vraisemblablement joué un rôle dans le dépérissement des arbres du bord nord. Le côté Est borde la piste : les anciens travaux de réalisation de cette piste ont bien pu compacté le sol de ce côté. Enfin, nous avons relevé avant défriche sur le côté Sud une ancienne piste de débusquage des billes de bois : dans cette zone, le sol a vraisemblablement été notablement compacté. Seule la zone centrale semble préservée de l'eau et du compactage : c'est aussi la zone où les arbres ont bien poussé.

La placette 2, située plutôt en haut de pente, est posée sur un relief régulier qui semble échapper à tout apport excessif d'eau et à tout autre problème. Pourtant, après une croissance initiale importante, les arbres sont en train de dépérir.

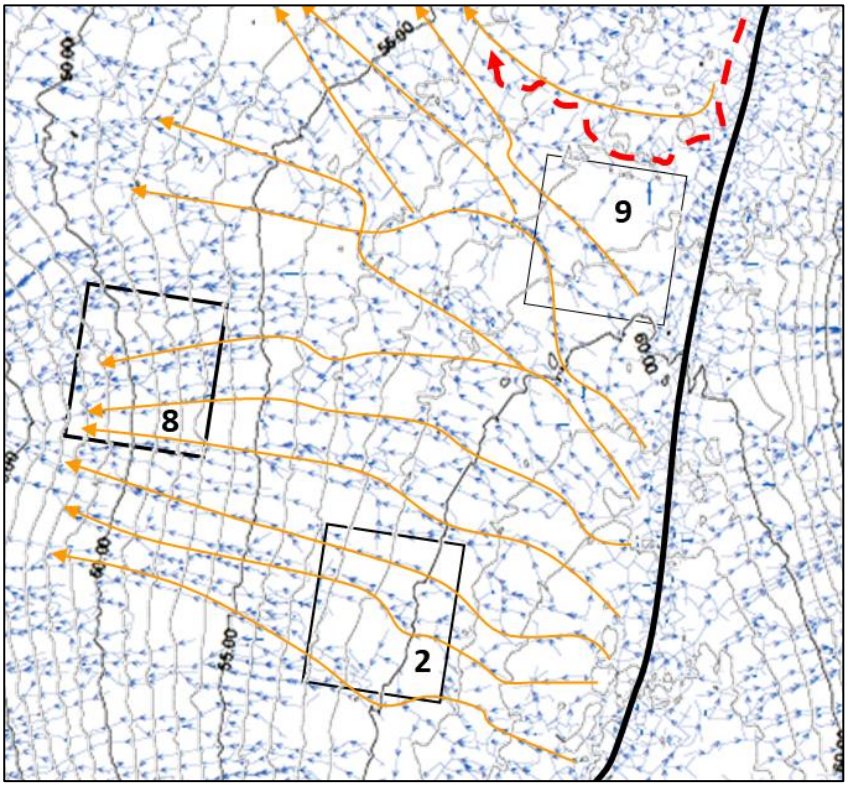


Fig. 27. Situation des 3 placettes de Tecks (Teck 2, 8 et 9) et écoulement des eaux de ruissellement sur la parcelle de Regina. Le trait noir épais matérialise la piste d'accès qui marque la ligne de crête. Les lignes grises sont les courbes de niveau. Les lignes bleues indiquent le sens d'écoulement des eaux. Le trait rouge discontinu matérialise le trajet d'eaux drainées par un canal de bord de piste. Les lignes oranges matérialisent les trajets généraux suivis par les eaux de ruissellement.

Une étude du système racinaire des arbres a été réalisée sur la durée du projet afin d'interpréter les différents comportements de croissance chez cette espèce. Ainsi, des individus suivis ayant exprimé des comportements contrastés, ont été

excavés intégralement afin de décrire la totalité de leur système racinaire. Ces excavations ont montré que la profondeur d'enracinement pouvait être associée à des comportements très contrastés. Ainsi, un arbre subissant une défeuillaison exacerbée en fin de première grande saison sèche était moins profondément enraciné (36 cm) qu'un arbre conservant toutes ses feuilles (86 cm) sans que la hauteur totale atteinte ne soit différente entre les 2 arbres (Fig. 28). La chute des feuilles pouvant être considérée comme une régulation des pertes d'eau par suppression de la surface photosynthétique, ce résultat suggère que les arbres enracinés peu profondément sont plus exposés au stress hydrique en grande saison sèche que d'autres et doivent se défaire de nombreuses feuilles.

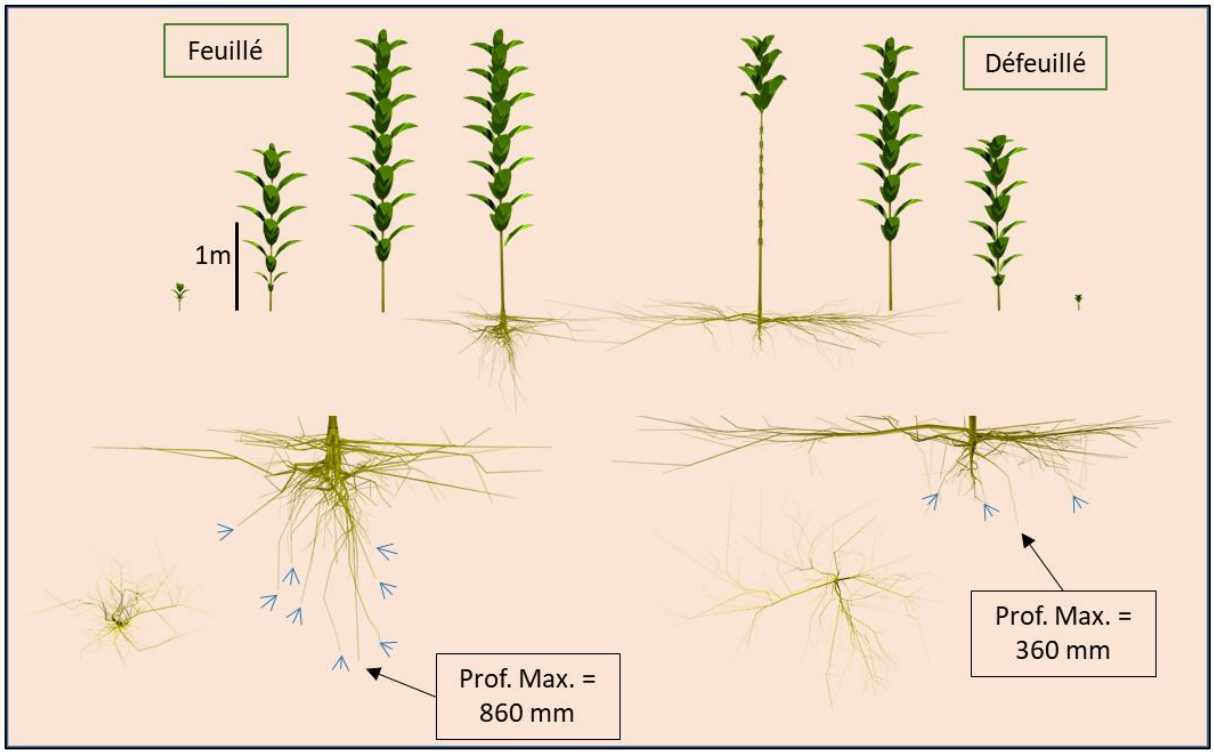


Fig. 28. Développement et profil du système racinaire de 2 tecks ayant exprimé un comportement de défeuillaison contrasté. En haut, les dessins montrent la séquence de développement de chacun des 2 arbres mesurés lors des inventaires successifs avant d'être excavés en grande saison sèche. Les systèmes racinaires respectifs sont figurés de profil et vus de dessus. Ces 2 arbres sont âgés de 285 jours après plantation. © A. de Haldat

Nous avons aussi observé, après passage de la première grande saison sèche, qu'un enracinement trop superficiel pouvait avoir un impact sérieux sur la croissance en hauteur des tecks. Ainsi, des tecks dont la croissance en hauteur est durablement bloquée étaient des arbres enracinés très superficiellement (Fig. 29). La profondeur maximale d'enracinement peut être très variable pour un âge donné. C'est le cas des 2 arbres évoqués précédemment (Fig. 28). Cette situation se retrouve aussi chez les derniers arbres excavés plus vieux et de hauteur différentes (50-800cm) : les arbres qui sont restés petits sont ceux dont les racines n'ont pas dépassé 50 cm de profondeur, tandis que les racines de l'individu de 8 m étaient à plus de 80 cm de profondeur. Il ressort aussi que la profondeur atteinte par les

racines au-delà de 80 cm permet de maintenir un taux de croissance en hauteur important, et que cette profondeur peut être atteinte précocement (Fig. 29).

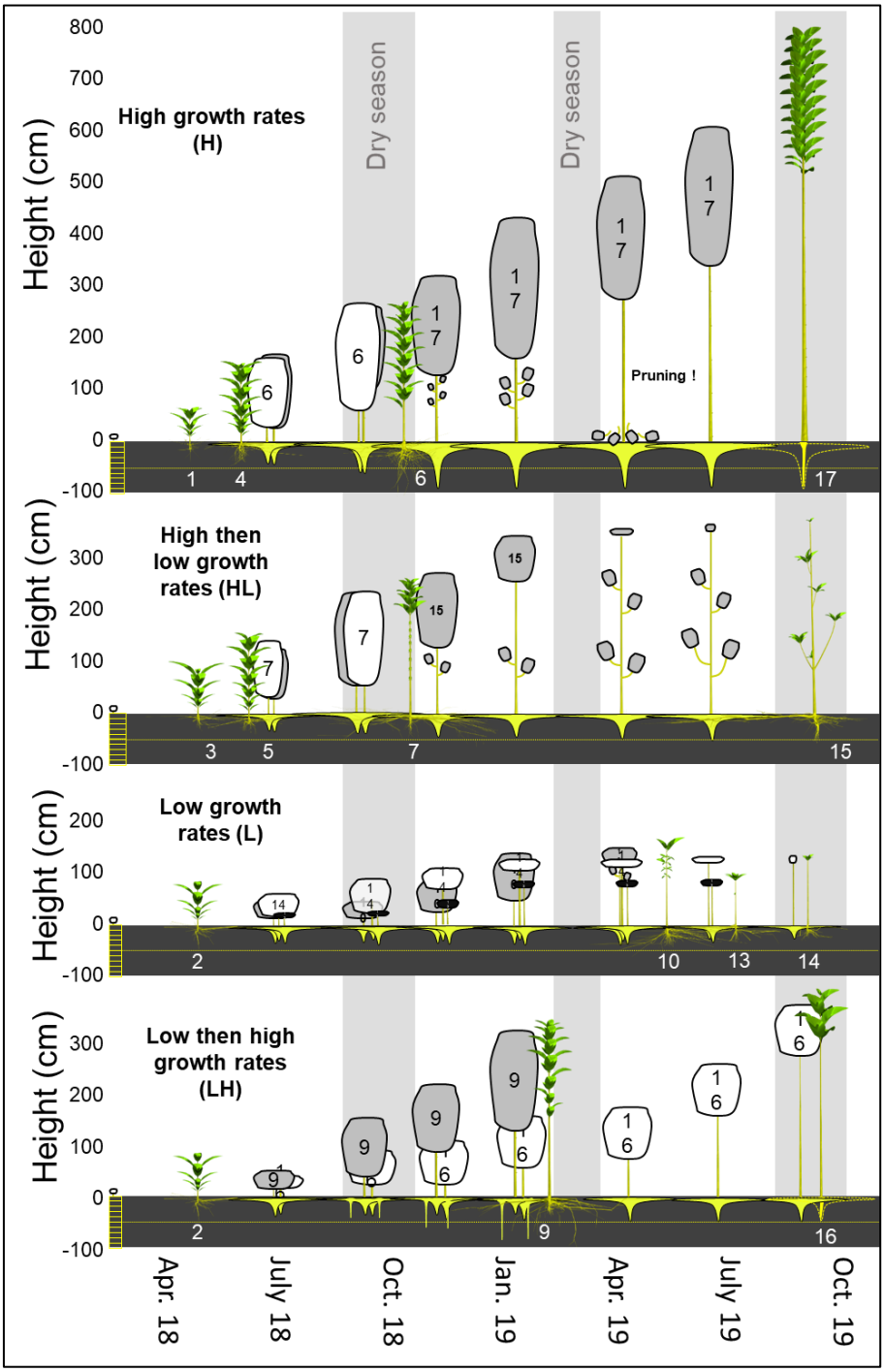


Fig. 29. Croissance en hauteur et profondeur d'enracinement de tecks d'âges et de comportement différents. La figure, constituée de 4 scènes, une pour chaque comportement, est un mélange de différents types de représentation : (1) des arbres très simplifiés dotés d'une hauteur totale et d'une hauteur feuillée fidèles, mais avec un système racinaire hypothétique ; (2) des arbres à apparence réelle, simulés par ordinateur après excavation et description complètes de leur structures aériennes et racinaires. Ainsi après une ou plusieurs descriptions partielles successives réalisées au cours d'un suivi, un individu est finalement collecté puis intégralement décrit. Chaque description, partielle ou complète, est réalisée à une date précise et donne lieu à une représentation dont la position sur la scène renseigne sur la date de description. De la même manière, l'échelle hauteur/profondeur est fidèle. Les bandes grises symbolisent les périodes sèches. Les 14 individus décrits ont été numérotés : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 13, 14, 15, 16 et 17.

Finalement, la chute des feuilles comme le blocage temporaire de la croissance en hauteur peuvent être considérés comme des indicateurs d'un stress hydrique relatif à un enracinement plus ou moins superficiel sur la parcelle de Regina. Mais

cela ne donne aucune information sur l'origine de cet enracinement superficiel. Les aspects édaphiques sont évidemment suspectés. Ainsi, nous pouvons émettre l'hypothèse que les bordures du placeau Teck 9 comme le placeau Teck 8 ne permettent pas un enracinement suffisamment profond.

Des prélèvements de sols dans le placeau Teck 8 ont révélé des signes d'hydromorphie temporaire (sols taché de rouille), ce qui n'a pas été le cas dans les autres placeaux. Le placeau Teck 8 a aussi un sol très sableux : avec 49% de sables grossiers pour seulement 27% d'argile sur un profil de sol de 1m, la capacité de rétention en eau du sol (les réserves en eau) de ce placeau ne doit pas être très importante en grande saison sèche, sans pour autant être préservé d'une hydromorphie temporaire en grande saison des pluies en raison de sa situation en bas de versant. Le couplage de l'hydromorphie temporaire qui doit limiter l'enracinement profond et de la faible réserve en eau du sol doit rapidement exposer les tecks du placeau 8 au stress hydrique en grande saison sèche, à la défeuillaison, au blocage de la croissance et finalement, au dépérissement. Ce dépérissement pouvant être vu comme un redimensionnement des arbres face aux conditions contraignantes qu'ils rencontrent.

Pour ce qui concerne les bordures du placeau Teck 9, nous pensons que le blocage de la croissance des arbres, et finalement leur dépérissement, sont le résultat aussi d'un blocage de la progression des racines mais cette fois-ci sur un sol compacté par des travaux anciens ou plus récents. En effet, nous avons relevé une ancienne piste de débardage sur la bordure sud de ce placeau. Par ailleurs, la proximité des andains suggère aussi que les engins lourds ont pu circuler dans ces endroits.

Tab. 1. Comparaison des caractéristiques des sols de Regina et ceux de la région d'origine des Tecks en Malaisie (Sabah).

	Regina	Sabah
Argile	40	29-33-34
limons	8	**15-19-23**
Sable fin	10	**32-40-49**
Sable grossier	42	**2-8-16**
pH eau		
pH KCL		
MO	1-7%	
CEC	4-12	**15,9**
C/N	15	**4-9**
Corg	2-6%	0,6-0,8%
N	0,25	0,22
Al	0,2-1,5	**0,02**
P total (g/kg)		0,09-0,206
Mn total (g/kg)	0,28	**4**
Ca (me/100g)	0,2-1,7	1,7-9,8
Mg (me/100g)		**1,08-7,1**
K ech (meq/100g)		0,08-0,27
Fe total (g/kg)	135	30-100

Néanmoins, la progression généralisée du dépérissement, même dans le placeau 2 et la partie centrale du placeau 9, suggère que la situation dans les placeaux de tecks n'est pas encore bien stabilisée et qu'elle n'est pas uniquement le reflet d'un enracinement superficiel. En effet, les zones d'arbres dépérissant se sont étendues depuis 2020, signe que les arbres en grandissant voient finalement leur développement se bloquer. Les zones d'arbres sains sont en train de disparaitre, signifiant peut-être la mauvaise adaptation du teck sur la parcelle de Regina. Des investigations sur les aspects granulométriques et chimiques

des sols de Guyane ont été réalisées (Tab. 1). Les 10 clones de teck plantés sont originaires du Sabah, une zone qui présente des conditions pédoclimatiques très différentes (Tab. 1). Ainsi la pluviométrie y est d'environ 2500 mm alors qu'elle est en moyenne de 3000 mm/an en Guyane et qu'elle a pu y atteindre plus de 6000 mm à Regina ces derniers mois. Les sols du Sabah sont aussi caractérisés par des quantités de sables grossiers (<20%) très inférieures à celles observées en Guyane (>40%). Les sols du Sabah ont aussi bien plus de limons (>15%) que les sols de Regina (<10%).

Fig. 30. Aspects des tecks des placeaux Teck 8 (ci-contre) et Teck 2 en dessous en octobre 2021 (45 mois).

Fig. 31. Aspects des tecks de la partie centrale du placeau Teck 9 en octobre 2021 (45 mois).

Pour les Cordias, espèce native de Guyane, les taux de croissance en hauteur progresse continument d'un inventaire à l'autre dans les 3 placeaux. C'est une espèce connue pour exprimer des taux de croissance très forts, comparables à ceux des bois canon espèces pionnières héliophiles du genre *Cecropia*. A Regina, de nombreux arbres croissent de plus de 2m par an (Fig. 32).

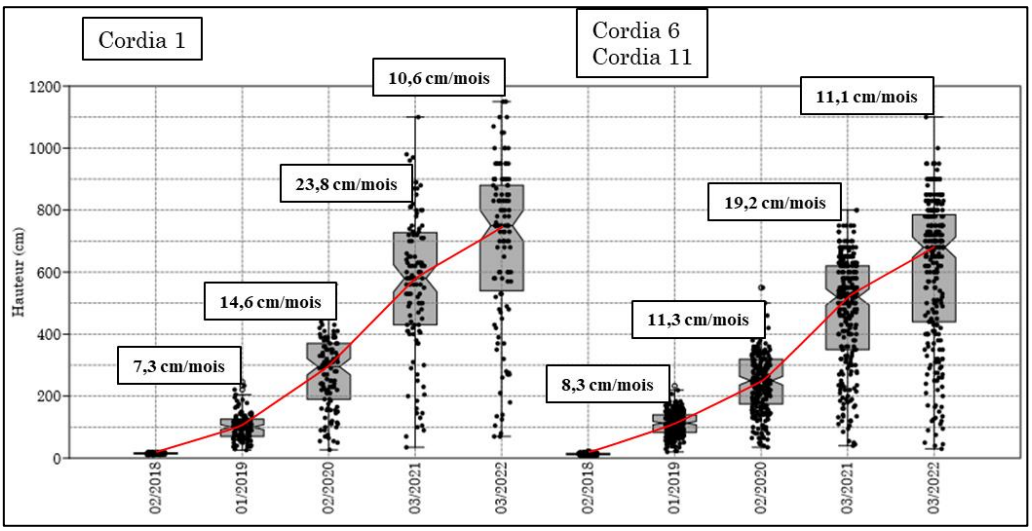


Fig. 32. Box plots de la hauteur totale des Cordias à 50 mois sur la parcelle de Regina à différentes dates d'inventaire (à 1, 12, 24, 38 et 50 mois). Les taux de croissance mensuels (cm/an) sont indiqués pour chaque placette et pour chaque période de croissance achevée par un nouvel inventaire. La hauteur totale des Cordias des placette 6 et 11 n'étant pas significativement différentes, ils ont été regroupés.

La placette Cordia 1 se démarque sensiblement des 2 autres : à 50 mois, les arbres de ce placeau sont sensiblement plus hauts que ceux des 2 autres placeaux bien que ce soit le placeau qui a subi la plus forte mortalité. Le placeau 1 est aussi le placeau qui est en sommet de pente, et donc avec des sols plus argileux ayant une rétention en eau supérieure que les sols des 2 autres parcelles.

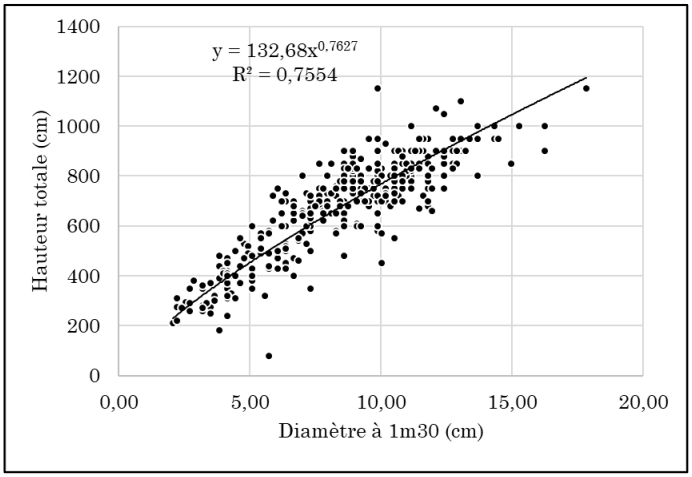


Fig. 33. Relation entre hauteur des arbre et diamètre à 1m30 au cours du développement des Cordias des placettes Cordia 1, 6 et 11 avec couvert de Stylosanthes guianensis

Cette espèce montre aussi des accroissements en épaisseur importants (fig. 33) : pour des arbres ayant des hauteurs de 8 m, le diamètre à 1m30 atteint déjà 10cm. A titre de comparaison, les Bagasses ayant un tronc de 10 cm de diamètre ont une hauteur moyenne de 10m.

Fig. 34. Aspects des Cordias du placeau Cordia 1 en octobre 2021 (45 mois).

<u>Pour les Niangons</u>, malgré la très forte mortalité qui a affecté les 3 placeaux, il est possible d'illustrer la croissance des arbres qui subsistent sur la parcelle. Il n'a pas été possible d'établir de différences entre les 3 placeaux (Kruskal-Wallis test for equal medians ; *p(same)*=0,5067). C'est la raison pour laquelle, nous avons

regroupé tous les arbres et ne présentons qu'une seule séquence (Fig. 35). Dans les 3 placeaux, les taux de croissance en hauteur progressent significativement et continument d'un inventaire à l'autre jusqu'à atteindre un taux de croissance moyen respectable de 300 cm/an. Ceci malgré la présence du couvert herbacé dans les 3 placeaux qui a vraisemblablement contribué à impacter la survie de cette espèce à installation plus lente.

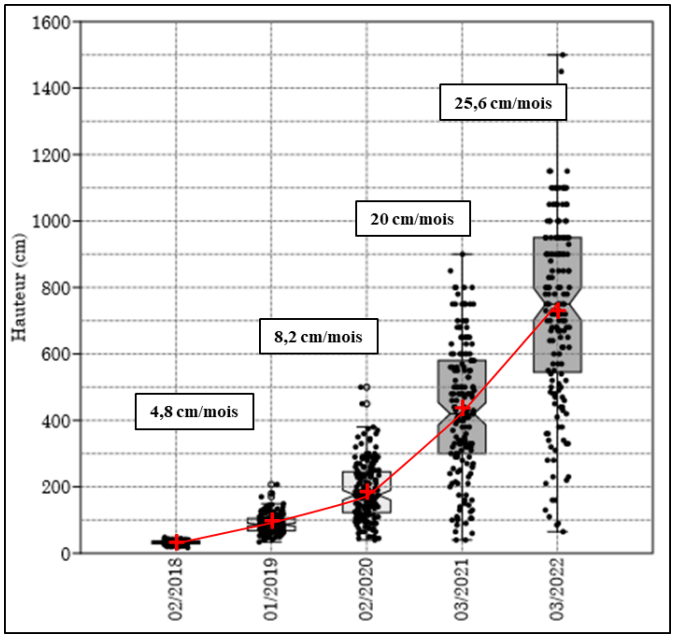


Fig. 35. Box plots de la hauteur totale des Niangons à différentes dates d'inventaire (à 1, 12, 24, 38 et 50 mois) sur la parcelle de Regina. Les taux de croissance mensuels (cm / mois) sont calculés à partir des valeurs moyennes (+ rouge) et indiqués pour chaque période de croissance achevée par un nouvel inventaire. La hauteur totale des Niangons à 50 mois n'étant pas significativement différentes d'une placette à l'autre, les arbres sont présentés sans distinction entre placettes.

Fig. 36. Aspects des Niangons du placeau Niang 5 en octobre 2021 (45 mois).

La figure 37 présente la répartition spatiale de différentes dynamiques de croissance. Contre toute attente, il n'a pas été possible d'établir de différences significative entre les 3 placeaux (Kruskal-Wallis test for equal medians ; *p(same)*=0,50). Ainsi, les Niangons du placeau Niang 12 (77% de mortalité) poussent aussi bien que ceux des autres placeaux Niang 3 (67%) et Niang 5 (48%).

Ainsi, les conditions de sol de ces 3 placeaux ne semblent pas imposer de contraintes significativement différentes aux arbres survivants. Ce qui pourrait signifier que les contraintes qui ont prévalu au cours des 6 mois après plantation et ont entrainé la mortalité dramatique lors de la première saison sèche, n'affectent visiblement pas les arbres « installés ». L'image conférée par la mortalité traduit-elle réellement une incompatibilité de croissance du Niangon sur les sols de ces placettes ?

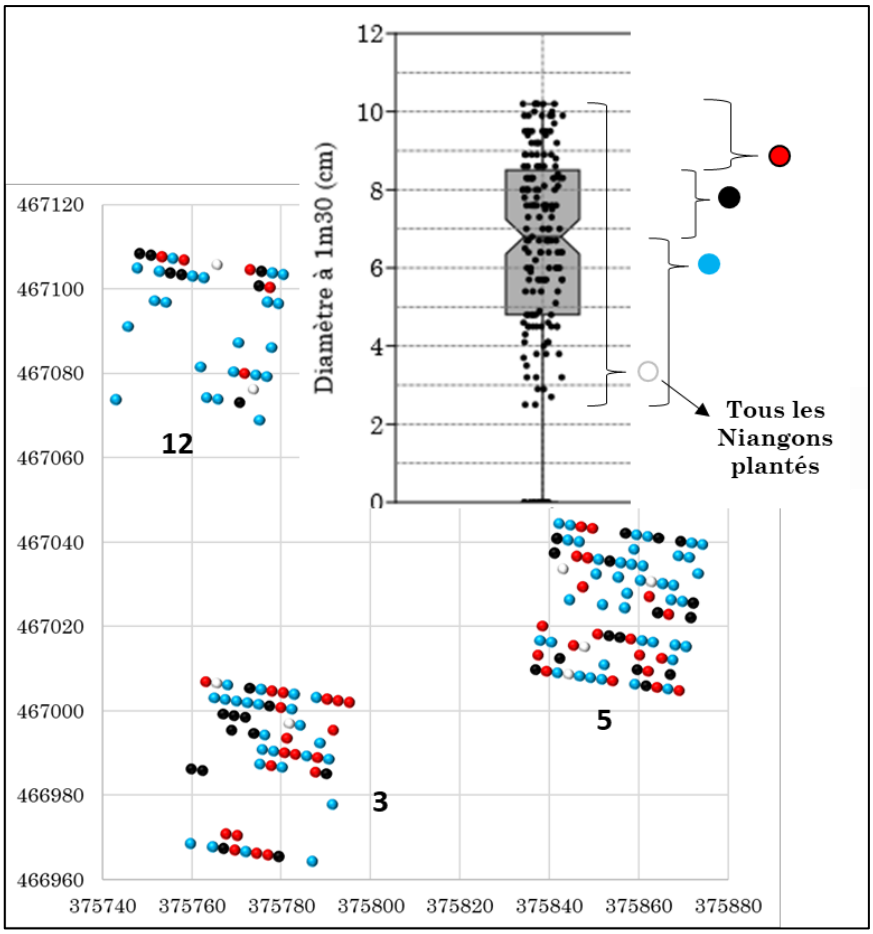


Fig. 37. Distribution spatiale des Niangons les plus développés et les mieux conformés 50 mois après plantation. La boite à moustache à gauche indique la variabilité du diamètre des Niangons survivants : ronds rouges pour les plus développés, ronds noirs pour les intermédiaires, ronds bleus pour les moins développés.

Il est aussi étonnant de constater que les bordures (Nord et sud) des 3 placeaux, au contact direct avec les andains, ont été moins affectées par la mortalité que les parties centrales (Fig 37 et 38). Influence de l'andain ? Humidité du sol préservée en grande saison à son voisinage ? Moindre installation de *S. guianensis* au voisinage de l'andain en raison d'un semis moindre ? Ou bien compaction plus importante au voisinage de l'andain ? Sans parvenir à cibler quel paramètre a été tamponné par le voisinage des andains, nous pensons de manière intuitive, que l'origine de la mortalité dramatique à Regina apparait comme la conjoncture de plusieurs paramètres : une pluviométrie exceptionnelle et un compactage de surface (covercrop en saison des pluies) ont compromis le développement racinaire de nombreux Niangons sans les faire disparaitre, tandis que la présence du couvre-sol de *S. Guianensis* a imposé une sérieuse concurrence pour l'eau en grande saison sèche à des arbres généralement mal enracinés.

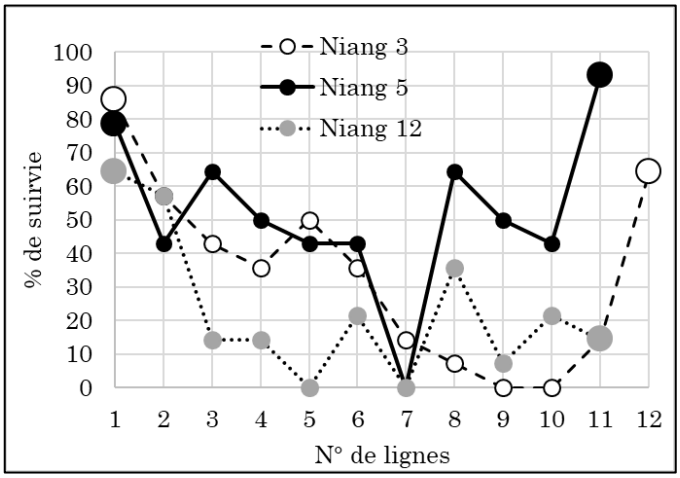


Fig. 38. Pourcentages de survie des Niangons sur les différentes lignes de plantation dans les 3 placeaux. Les points de plus grandes tailles désignent les lignes de plantation des bordures nord et sud, au contact direct avec les andains, tandis que les lignes 6 et 7 sont les plus centrales.

Nous pensons aujourd'hui que l'absence d'un de ces 3 paramètres (pluviométrie plus basse ou absence de *S. Guianensis* ou travail du sol hors saison des pluies) sur le site de Regina aurait permis d'éviter la mortalité dramatique des Niangons à l'installation. Enfin, nous pensons aussi que les conditions qui prévalaient à la plantation, qui ont affecté le développement et la survie des Niangons, n'affectent plus aujourd'hui le développement de cette espèce. En effet, la figure 39 montre clairement que la hauteur totale des Niangons après 50 mois de développement au voisinage immédiat des andains n'est pas significativement supérieure à celle des arbres croissant au centre des mêmes placettes, au moins pour 2 placettes sur 3.

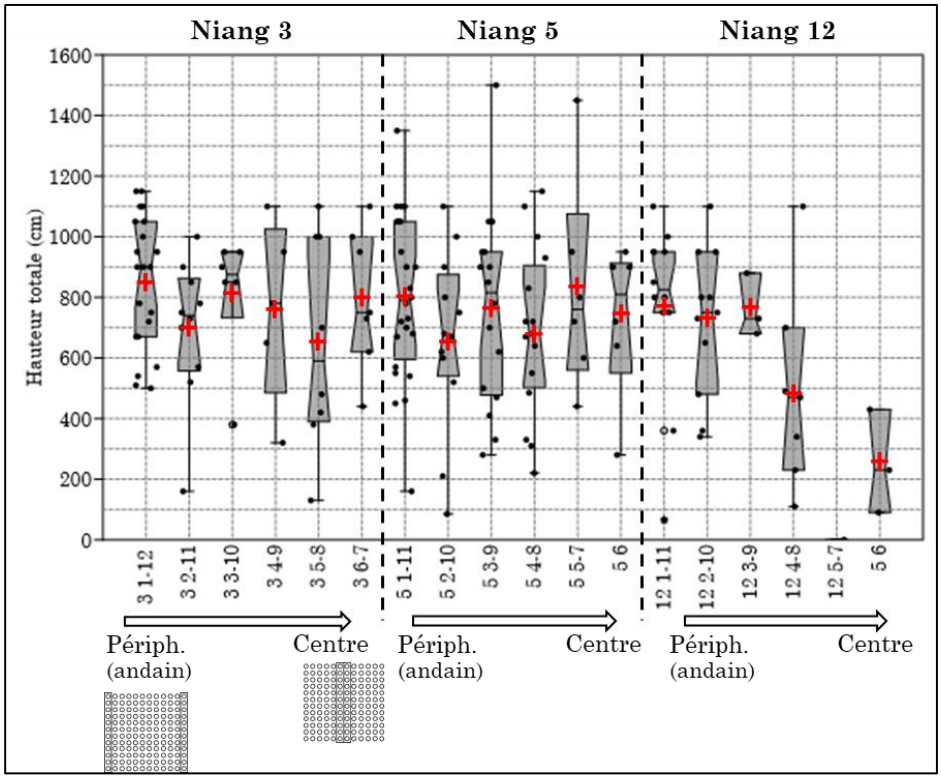


Fig. 39. Hauteur totale (cm) des Niangons après 50 mois de développement par placette et en fonction de leur proximité avec les andains. En abscisse : n° de la placette (3, 5 ou 12) + n° de ligne (de 1 à 12 ou de 1 à 11). Les lignes au contact direct des andains sont 1 et 11, ou bien 1 et 12. Les lignes les plus éloignées des andains, au centre des placettes sont 6 et 7 ou seulement 6.

Les Niangons sont sensiblement plus élancés que les Bagasse puisqu'après avoir atteint 10 cm de diamètre de leur tronc, ils dépassent 11 m de haut.

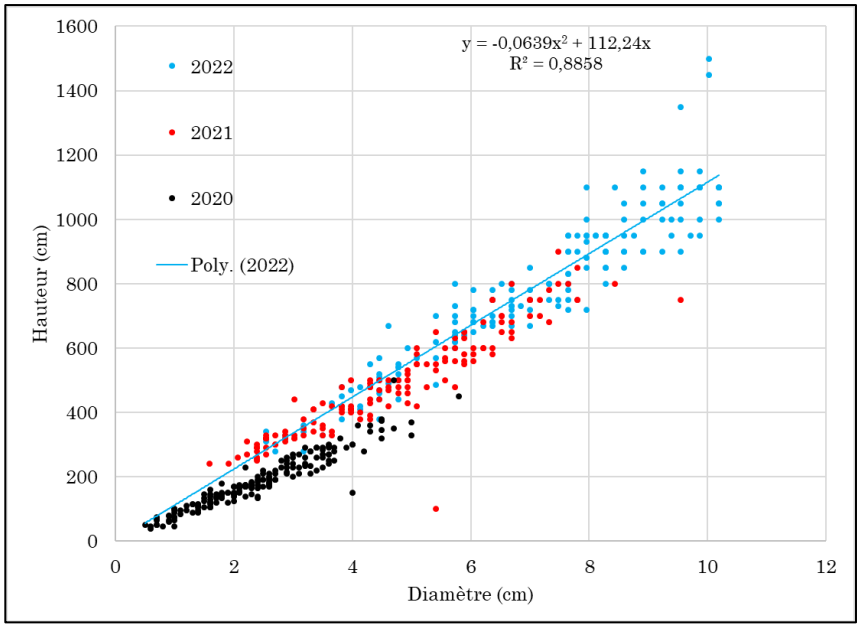


Fig. 40. Relation entre hauteur des arbres et leur diamètre à 1m30 au cours du développement des Niangons associés à S. guianensis.

<u>Pour les Ingas</u>, les 6 placeaux ont subi des mortalités variables, souvent importantes (40 à 85%), qui ne permettent pas de se faire une idée claire des zones les plus favorables au développement de cette espèce. Toutefois, ce sont les placeaux avec couvert herbacé de *S. guianensis* qui montrent les meilleurs scores (Fig. 41). Ce sont aussi les plants des placeaux des sommets de pente qui poussent le moins. Le sol est-il plus induré dans ces zones ? Ces zones reçoivent-elles moins d'eau ? *Inga edulis* est une espèce qui a besoin d'eau et d'azote. Les bas de pente peuvent convenir, tout comme l'apport azoté émanant du développement de *S. guianensis* fixateur d'azote (voir Fig. 46). Mais il faut savoir aussi que certaines légumineuses fixatrices d'azote sont capables d'agir sur les liaisons entre l'oxyde de fer et le phosphore immobilisé pour le rendre plus disponible comme cela a été démontré récemment (V. Freycon, comm. Pers). La conjonction de la situation topographique et de l'effet *Stylosanthes* pourrait bien expliquer cette situation.

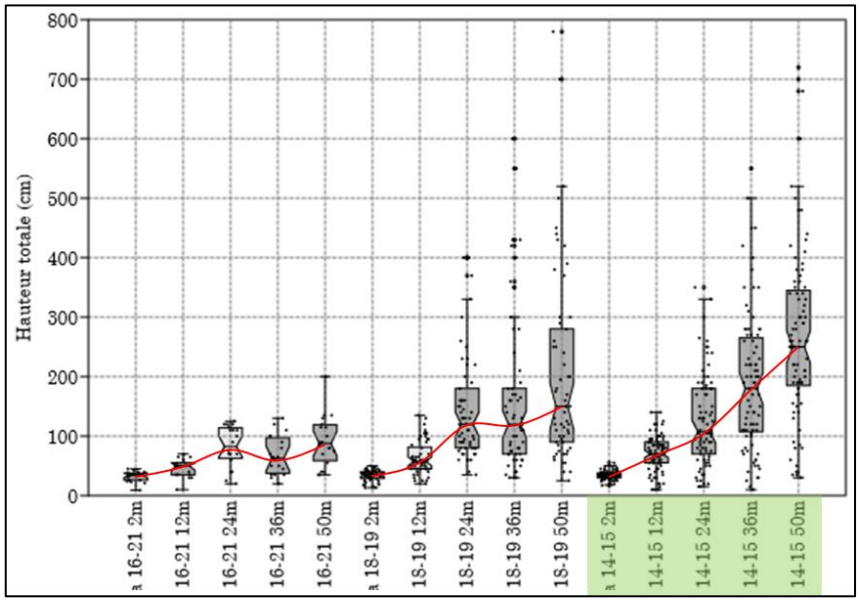


Fig. 41. Box plots de la hauteur totale des Ingas sur les 6 placettes plantées (14, 15, 16, 18, 19 et 21) à différentes dates d'inventaire (à 1, 12, 24, 36 et 50 mois ; respectivement 1m, 12m, 24m, 36m et 50m). Les placeaux avec couvert herbacé de Stylosanthes guianensis sont indiqués par des encadrés à fond vert.

<u>C/ Conformation des arbres.</u>

Les Bagasses. Après 50 mois de développement, les Bagasses de Regina ont atteint de belles dimensions et expriment une telle dynamique qui permet d'envisager le futur peuplement sur la parcelle. Le tableau 2 renseigne sur la conformation des Bagasses en fonction des dimensions qu'elles ont atteintes, ici, le diamètre à 1m30. Quelle que soit la classe de diamètre, les Bagasses bien conformées constituent la majeure partie du peuplement, soit 74 %, ce qui est très satisfaisant, tandis que les bagasses fourchues ou abimées ne comptant que pour 26 %, Parmi les bagasses bien conformées et les plus développées, 42% ont un diamètre à 1m30 compris entre 9 et 17 cm, c'est-à-dire ayant exprimé un accroissement annuel compris entre 2,25 cm/an et 4,25 cm/an.

Tab. 2. Pourcentage de différentes classes de conformation chez des Bagasses appartenant à différentes classes de diamètre à 1m30 sur la parcelle de Regina 50 mois après plantation. 1 : non fourchu, 2 : fourchu, 3 : multi-tige, 3 : dégât/blessure.

	Classes de conformation			
Classes de diamètre à 1m30	**1**	**2**	**3**	**4**
1er quart : 0 à 7,3 cm	14,2	4,9	0,3	3,8
2ème quart : 7,4 à 9,4 cm	16,9	3,3	0,0	3,9
3ème quart : 9,5 à 11,5 cm	23,4	3,5	0,0	2,8
4ème quart : 11,6 à 17 cm	19,2	2,8	0,0	1,1

Parmi les Bagasses « bien conformées », certaines ont reçu une taille de formation destinée à supprimer soit des branches un peu trop développées, soit des grosses branches dupliquant le développement du tronc et contribuant à la constitution d'une fourche qui déprécie leur conformation. Finalement, ces bagasses taillées ne sont pas nombreuses puisque les individus spontanément bien conformés constituent plus de 70% des individus (Tab. 3). La Bagasse n'est pas une espèce qui pose des problèmes de conformation.

Classes de diamètre à 1m30	**Taille**	**%**
1er quart : 0 à 7,3 cm	**Non taillée**	**74**
	Branche	11
	Fourche	15
2ème quart : 7,4 à 9,4 cm	**Non taillée**	**71**
	Branche	14
	Fourche	15
3ème quart : 9,5 à 11,5 cm	**Non taillée**	**73**
	Branche	16
	Fourche	10
4ème quart : 11,6 à 17 cm	**Non taillée**	**72**
	Branche	16
	Fourche	12

Tab. 3. Pourcentage des Bagasses « bien conformées » ayant fait l'objet ou non d'une « taille de formation ».

La figure 42 présente la distribution spatiale des bagasses à la fois les plus développées et les mieux conformées sur la parcelle de Regina (ronds rouges et ronds noirs). Finalement, les bagasses bien conformées sont présentes partout sur le dispositif. En revanche sur certaines placettes (Bag 4, 20, 14…), elles sont plutôt regroupées ou absentes, évitant les endroits recevant trop d'eau et révélant ainsi l'hétérogénéité des conditions édaphiques.

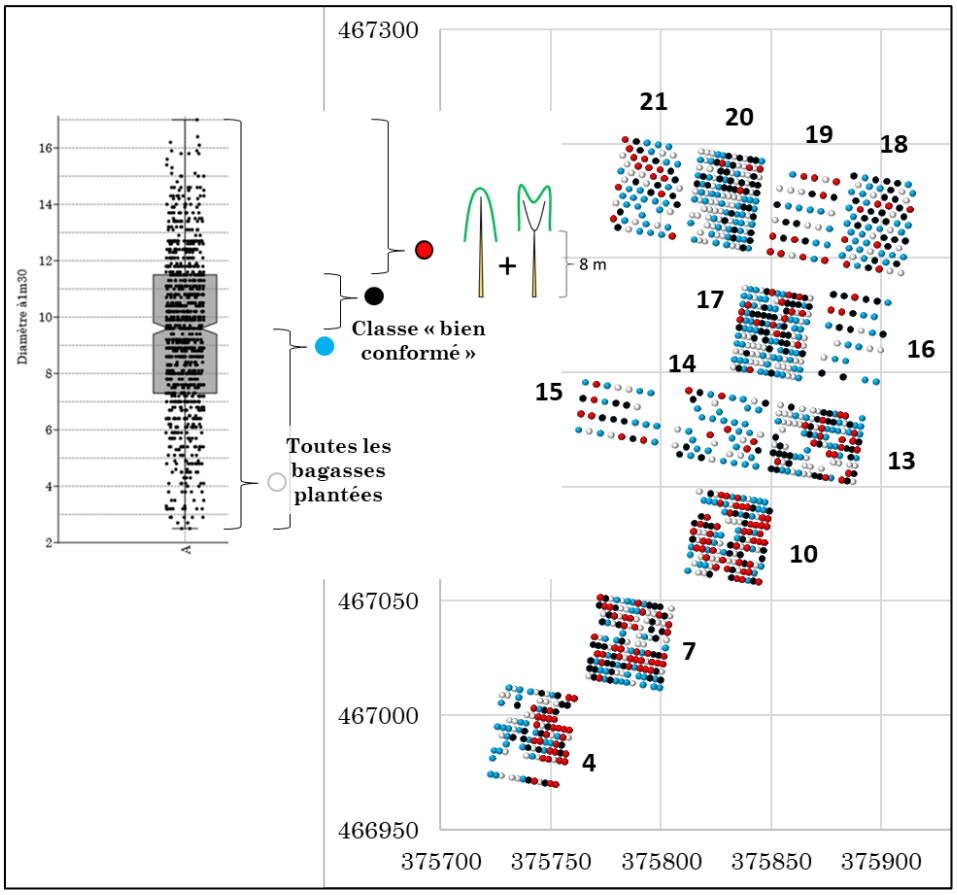


Fig. 42. Distribution spatiale des bagasses les plus développées et les mieux conformés (sans fourche ou fourche à plus de 8m de haut) 50 mois après plantation. La boite à moustache à gauche indique la variabilité du diamètre des bagasses plantées sur le site (ronds blancs). Les bagasses « bien conformées » sont figurées par des ronds rouges (les plus développées), des ronds noirs (les intermédiaires) et des ronds bleus (les moins développées).

Les Cordias. Le tableau 4 renseigne sur la variabilité de la conformation des Cordias en fonction des dimensions atteintes, ici, le diamètre à 1m30. Quelle que soit la classe de diamètre, les Cordias bien conformés après 50 mois de développement constituent plus de 80 % du peuplement, tandis que les Cordias fourchus ou abimées ne comptant que pour environ 20 %.

Tab. 4. Pourcentage de différentes classes de conformation chez des Cordias appartenant à différentes classes de diamètre à 1m30 sur la parcelle de Regina 50 mois après plantation. 1 : non fourchu, 2 : fourchu, 3 : multi-tige, 3 : dégât/blessure.

	Classes de conformation			
Classes de diamètre à 1m30	**1**	**2**	**3**	**4**
1er quart : 0 à 6,2 cm	88	6	4	3
2ème quart : 6,4 à 8,6 cm	90	5	0	4
3ème quart : 8,8 à 10,8 cm	82	14	0	4
4ème quart : 10,9 à 18 cm	85	11	0	4

Parmi les Cordias « bien conformés », certains ont aussi reçu une taille de formation. Les individus spontanément bien conformés constituent de 60 à 70% des individus (Tab. 5), faisant du Cordias une espèce qui ne pose pas vraiment de problèmes de conformation.

Tab. 5. Pourcentage des Cordias « bien conformés » ayant fait l'objet ou non d'une « taille de formation ».

Classes de diamètre à 1m30	Taille	%
1er quart : 0 à 8,6 cm	**Non taillé**	**68**
	Taillé	32
2ème quart : 8,8 à 18 cm	**Non taillé**	**57**
	Taillé	43

La figure 43 présente la distribution spatiale des Cordias qui sont à la fois les plus développés et les mieux conformés sur la parcelle de Regina (ronds rouges et ronds noirs). Sur les placettes 5 et 11, les plus développés sont plutôt regroupés, révélant l'hétérogénéité des conditions pédologiques. Seule la placette 1 présente une meilleure répartition qui pourrait à terme « gommer » la mortalité initiale non négligeable qui avait créé de nombreux vides.

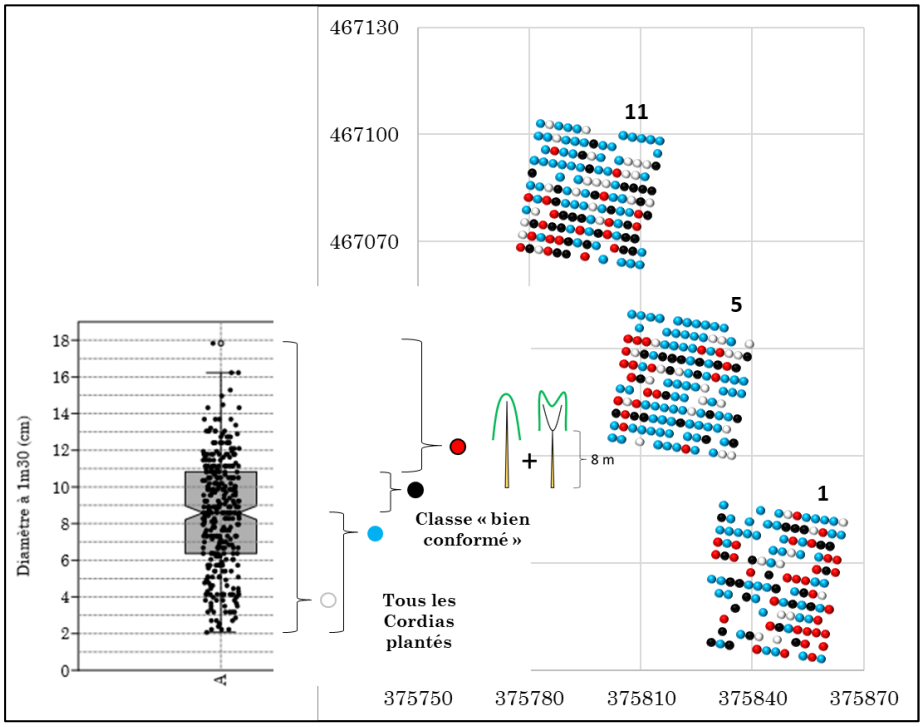


Fig. 43. Distribution spatiale des Cordias les plus développés et les mieux conformés (sans fourche ou fourche à plus de 8 m de haut) 50 mois après plantation. La boite à moustache à gauche indique la variabilité du diamètre des Cordias plantés sur le site (ronds blancs). Les Cordias « bien conformés » sont figurés par des ronds rouges (les plus développés), des ronds noirs (les intermédiaires) et des ronds bleus (les moins développés).

<u>Les Niangons</u>. Après 50 mois de développement, les Niangons ne présentent aucuns défauts puisqu'ils sont le plus souvent non ramifiés malgré des hauteurs importantes (Fig. 44 à droite).

<u>Les tecks</u>. De même, après 50 mois, les Tecks fourchus issus des 10 clones plantés sont rares. Toutefois, de nombreuses branches peuvent apparaitre sur le tronc et atteindre des dimensions importantes qui nécessite une taille sans attendre un élagage naturel qui pourrait tarder (Fig. 44 à droite) comme ne pas se produire.

Fig. 44. Tecks âges de 15 mois venant juste d'être élagués (à gauche) et Niangons (à droite).

D/ Effet de la présence du couvert herbacé de *Stylosanthes guianensis* sur la quantité d'azote foliaire des arbres plantés (A. Galiana).

L'azote (N) possède 16 isotopes connus. Deux d'entre eux sont stables et présents dans la nature : l'azote 14 (^{14}N) représente la quasi-totalité de l'azote présent (99,64 %), tandis que l'azote 15 (^{15}N) représente seulement 0,364 % de l'azote présent sur Terre. Dans l'air ambiant, la valeur du ratio $^{15}N/^{14}N$ est de 0,3663%. Dans le sol, la valeur de ce rapport est sensiblement différente et variable en fonction des microorganismes qui y vivent. Ainsi, la valeur du ratio $^{15}N/^{14}N$ dans un organisme peut donner des indices sur son régime alimentaire, sur son type de nutrition.

Les légumineuses fixatrices d'azote tirent une bonne partie de leur azote de l'air ambiant au travers de la fixation bactérienne de l'azote qui a lieu dans leurs nodules racinaires. Ces plantes montrent une valeur du ratio $^{15}N/^{14}N$ spécifique qui se rapproche de celle observée dans l'air ambiant qui est de 0,3663%. En revanche, la valeur de ce rapport est différente chez les plantes non fixatrices d'azote qui tirent essentiellement leur azote de la minéralomasse du sol.

Cependant, la proximité entre légumineuses fixatrices d'azote et plantes non fixatrices d'azote peut permettre des échanges entre plantes. Ainsi, les arbres (Bagasse, Teck, Cordia) poussant dans le voisinage de la légumineuse *S. guianensis* peuvent récupérer/profiter d'une partie de l'azote provenant de la fonction de fixation des légumineuses. A Regina, cela a-t-il été le cas ? Pour répondre à cette question, nous avons prélevé des feuilles chez les différents végétaux en présence en notant leur proximité avec tel ou tel végétal planté (Bagasse, Cordia, Teck), mais aussi spontanément présent dans le recru adventif (Cecropia, Vismia).

- Arbres forestiers plantés (Bagasse, Cordia, Teck) **« pure »** sans voisinage avec *S. guianensis*.
- Arbres forestiers plantés (Bagasse, Cordia, Teck) **« mixte »** au voisinage de *S. guianensis*.
- Arbres forestiers du recru adventifs (Cecropia, Vismia) **« pure »** sans voisinage avec *S. guianensis*.
- *S. guianensis* **« pure »** sans voisinage avec arbres forestiers plantés ni autres légumineuses.

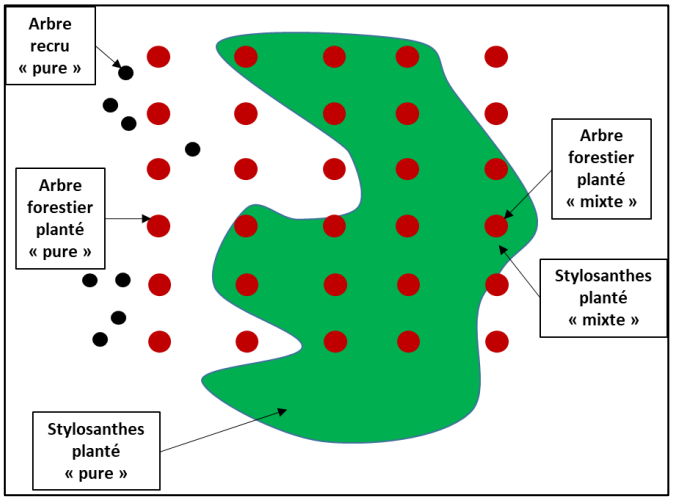


Fig. 45. Protocole de collecte des feuilles sur les arbres plantés (points rouges), les arbres du recru adventif (points noirs) et S. guianensis (nappe verte) en différentes situations.

Puis nous avons procédé en laboratoire à un dosage foliaire des deux isotopes de l'azote, calculé le ratio $^{15}N/^{14}N$ et comparé les différentes valeurs obtenues pour les différentes modalités de collecte.

La plus basse valeur médiane du ratio $^{15}N/^{14}N$ est observée pour la légumineuse *S. guianensis* en situation isolée (Fig. 46 ; « Stylosanthes pure »). A l'opposé, tous les autres végétaux « pure » (« Bagassa pure », « Cordia pure », « Tectona pure », « Vismia pure », « Cecropia pure ») ont des valeurs médianes bien supérieures. A noter « Inga pure » qui a une valeur médiane assez basse : c'est aussi un végétal fixateur d'azote ! Finalement, les valeurs médianes les plus proches de celle de « Stylosanthes pure » sont les végétaux plantés croissant au milieu du couvert herbacé de *S. guianensis* « mixte », soit (« Bagassa mixte », « Cordia mixte » et « Tectona mixte », ont une valeur de rapport basse. La similitude de la valeur du partitionnement entre « Stylosanthes pure » et les espèces plantées « mixte » établit qu'il **y a bien eu récupération par les arbres plantés de l'azote fixé par la légumineuse *Stylosanthes guianensis*.**

Nous avons vu précédemment qu'après 50 mois de croissance, les bagasses croissant avec un couvert herbacé de *S. guianensis* avaient des valeurs de hauteur et diamètre de tronc significativement supérieures à celles croissant sans *S. guianensis*, Ceci malgré un léger retard pris en première année au cours de la grande saison sèche (compétition pour l'eau accrue en présence de *S. guianensis*). Sans exclure les autres services rendus par *S. guianensis*, nous pouvons affirmer que les bagasses associées à *S. Guianensis* disposent de plus d'azote que celles croissant sans *S. guianensis*.

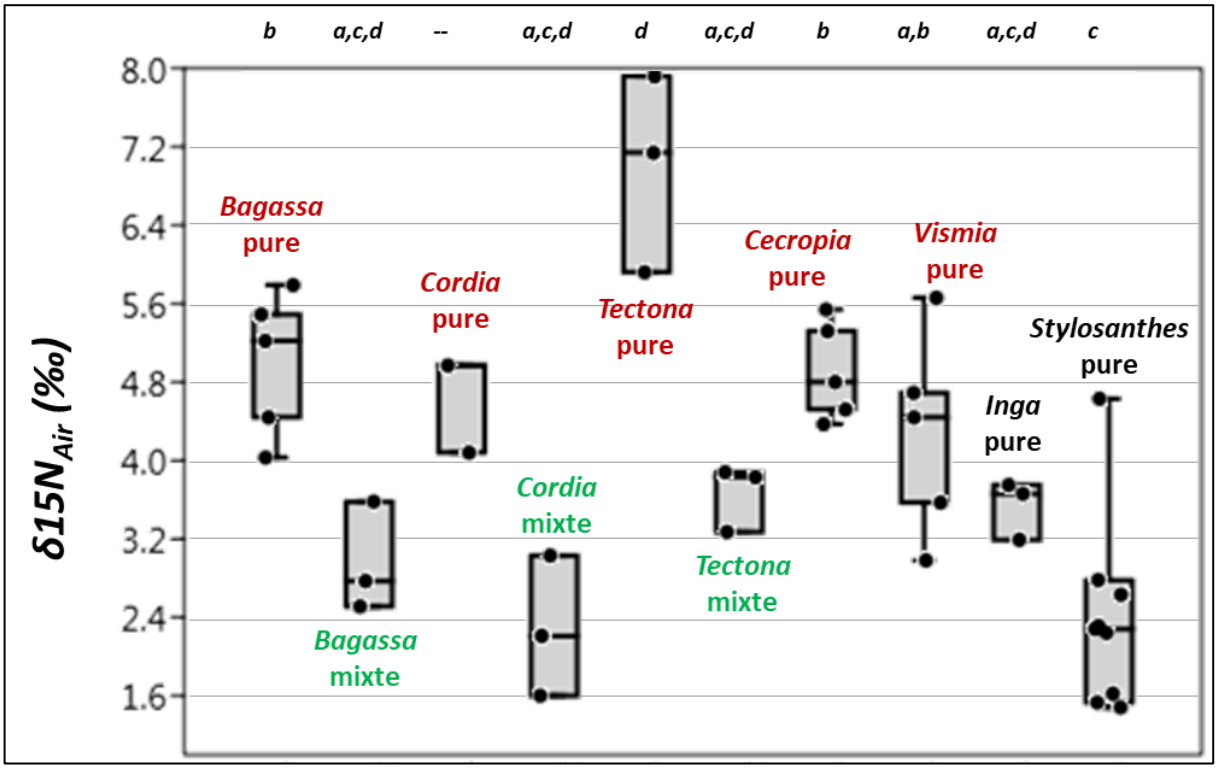


Fig. 46. Box plots de la valeur du ratio foliaire $^{15}N/^{14}N$ chez les arbres plantés, les arbres du recru adventif et S. guianensis en différentes situations : « pure » (sans voisinage immédiat avec S. guianensis) ou « mixte » (avec voisinage avec S. guianensis).

E/ Complément d'information.

La Guyane a connu une pluviométrie exceptionnelle entre avril 2021 et aout 2022 avec une quantité d'eau cumulée exceptionnelle (Fig. 47). Une visite supplémentaire a été réalisée en juillet 2022 au terme de la grande saison des pluies 2022 par V. Bézard (ONF) et Adrien Testé (Guyane Forest Initiative). Leur reportage photographique permet de bénéficier d'un point d'observation supplémentaire à 54 mois et de se rendre compte de l'état à un moment où les arbres ont reçu les plus grandes quantités de pluie.

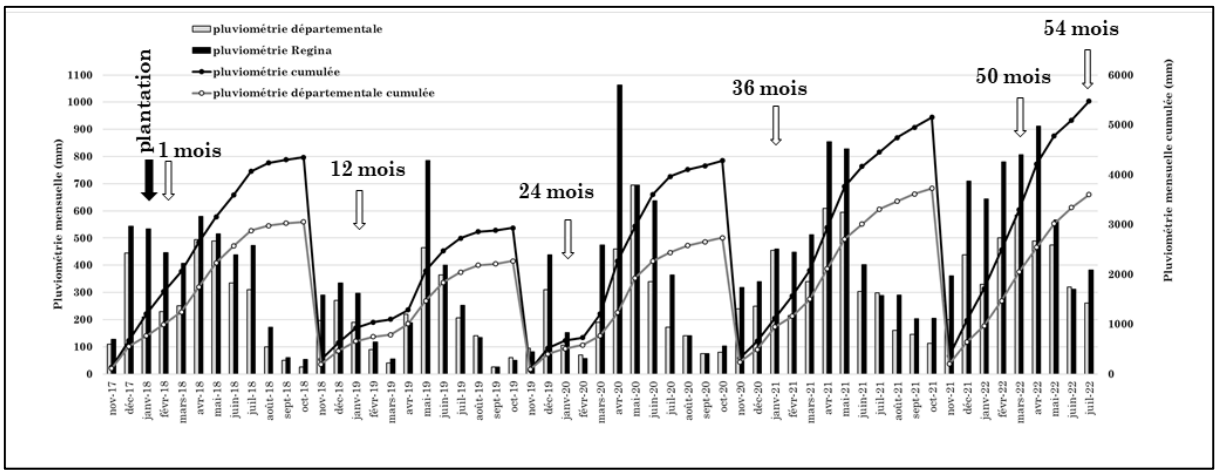


Fig. 47. Evolution de la pluviométrie mensuelle ou cumulée sur 12 mois [novembre-octobre] pour les années 2018 à 2022 à Regina et sur l'ensemble du département durant la période de suivi de la parcelle. D'une manière générale, il y a une progression régulière de 2019 à 2022, année de tous les records. Les flèches blanches indiquent les différentes dates d'inventaire.

Tous **les Niangons** montrent un état sanitaire excellent au travers de la conservation de grandes séries foliaires et d'un feuillage bien vert foncé. Ils sont aussi généralement en croissance active (photographie suivante ; © Adrien Testé).

Fig. 48. Aspect des Niangons de la placette Niang 5 sur le site de Regina en juillet 2022. (© Adrien Testé).

En revanche, la plupart **des Bagasses** sont intégralement défeuillées (Fig. 49). Cette défeuillaison extrême pourrait être un signe négatif chez cette espèce plutôt donnée pour ne défeuiller intégralement que pour des stades assez avancés, plus proches du stade adulte. Toutefois, les 2 photographies montrent des arbres plutôt bien développés, bien structurées portant des structures ramifiées apparemment

intègres, un signe que les rameaux et leurs extrémités sont encore vivantes : des émergences apicales vert-clair montrent le redémarrage de la croissance chez quelques axes sommitaux.

Fig. 49. Aspect des Bagasses défeuillées sur une placette du site de Regina en juillet 2022 (au-dessus). La photographie de gauche donne un aperçu de l'état des axes sommitaux des houppiers. (© Adrien Testé).

Notre surprise devant cet aspect nouveau n'a d'égale que notre ignorance de nombreuses facettes du développement de cette espèce au stade jeune. Pour rappel, la Bagasse est un arbre caducifolié, c'est à dire qu'il peut se défeuiller intégralement au cours de son développement, généralement au terme de la phase de repos végétatif apparent. Tous les arbres défeuillent chaque année (Loubry 1994 ; en précisant ici que Denis Loubry étudiait plutôt des arbres assez développés). Etant donné que les arbres peuvent avoir des cycles décalés, Loubry (1994) a pu observer des arbres intégralement défeuillés tout au long de l'année, sauf en février. Par ailleurs, dans la réserve de Tapajos, état du Para (Brésil), il a été enregistré simultanément jusqu'à 43,7% d'arbres femelles totalement défeuillés et 24,2% d'arbres mâles défeuillés, en juillet 2002 et juillet 2003, période précédant la floraison (Maués *et al.* 2007). Cette partie de l'état du Parà a une saisonnalité bien

définie avec une saison des pluies de décembre à mai et une saison sèche de juin à novembre (Cosme de Oliveira Junior *et al* 2015 ; https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1552), et où le mois de juillet a un statut de transition entre saison des pluies et saison sèche. Comme en Guyane ! Il n'est pas étonnant de voir nos jeunes bagasses intégralement défeuillées à cette période de l'année. Si la grande saison des pluies, de par ses conditions stressantes, est parfois comparée à un « hiver végétatif », il n'est pas étonnant de la voir défeuiller au cours de cette période. Il est bien probable que les Bagasses de Regina soient déjà entrées dans une seconde phase de leur développement durant laquelle, les arbres se défeuillent intégralement de manière saisonnière. Une preuve ici que les choses semblent se dérouler pour le mieux pour cette espèce sur cette parcelle.

Les Tecks ont un aspect que nous leurs connaissons bien. Le centre de la placette Teck 9 héberge des arbres bien feuillés, tandis que les bordures sont des arbres dépérissant. Les arbres sont aussi intégralement défeuillés sur les 2 autres placettes Teck 2 et Teck 8 avec de nombreux arbres dépérissant sur cette dernière.

Fig. 50. Aspect des Tecks sur une placette du site de Regina en juillet 2022. (© Adrien Testé).

<u>Les Cordias</u> sont plus ou moins défeuillés sans tendance particulière. Pour information, cette espèce n'est pas une espèce décidue même au stade adulte, et toute défeuillaison totale est un signe fort de détresse de l'arbre.

Fig. 51. Aspect des Cordias sur une placette du site de Regina en juillet 2022. (© Adrien Testé).

Un dernier inventaire réalisé **en janvier 2023**, au moment où s'achevait la rédaction de ce chapitre, a permis de contrôler l'état sanitaire ainsi que la croissance en épaisseur à la base du tronc des arbres 5 ans après la plantation.

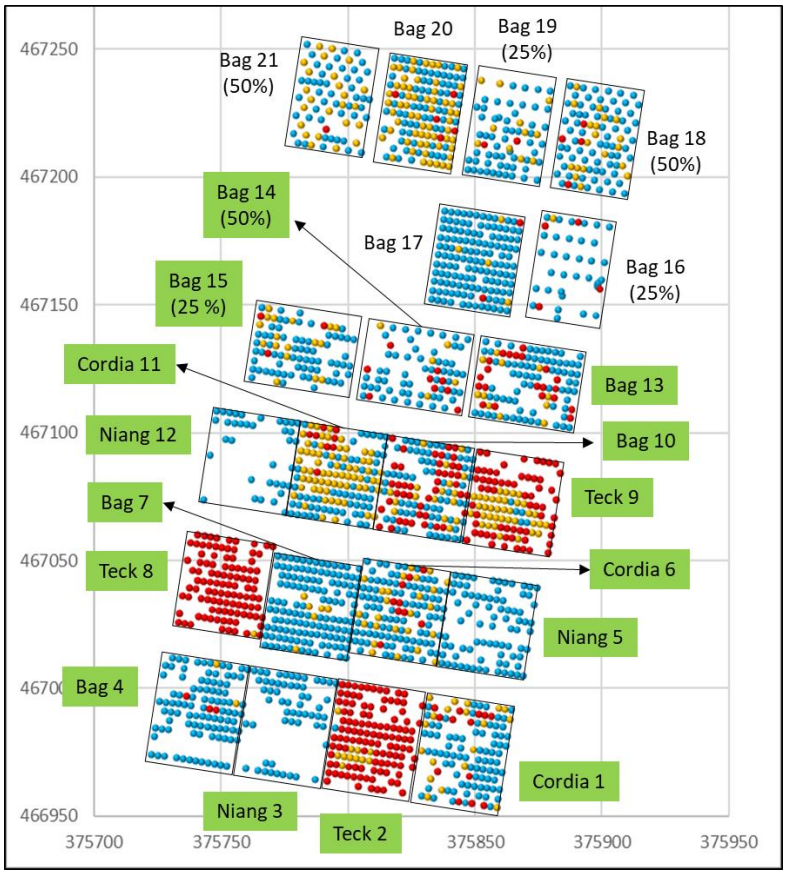


Fig. 52. Répartition des arbres sains (bleu), en souffrance (orange) ou dépérissant (rouge) dans la parcelle de Regina 5 ans après plantation. Chaque point est un arbre vivant en janvier 2023.

Ce sont les Niangons qui affichent un excellent état sanitaire (Fig. 52) et les meilleurs accroissements

diamétriques moyens du tronc (1 à 2 cm en 1 an ; Fig. 53) malgré les conditions pédoclimatiques complexes de cette année 2022.

Les Bagasses ont un peu plus souffert de ces conditions difficiles puisque certaines dépérissent (Fig. 52), comportement que nous n'avions pas observé auparavant pour cette espèce. Néanmoins, ces individus en souffrance sont très loin d'être majoritaires et les Bagasses affichent plutôt de très bons accroissements diamétriques moyens (0,5 à 1 cm en 1 an ; Fig. 53) en faisant remarquer que les arbres avec des accroissement diamétriques > 2 cm ne sont pas rares.

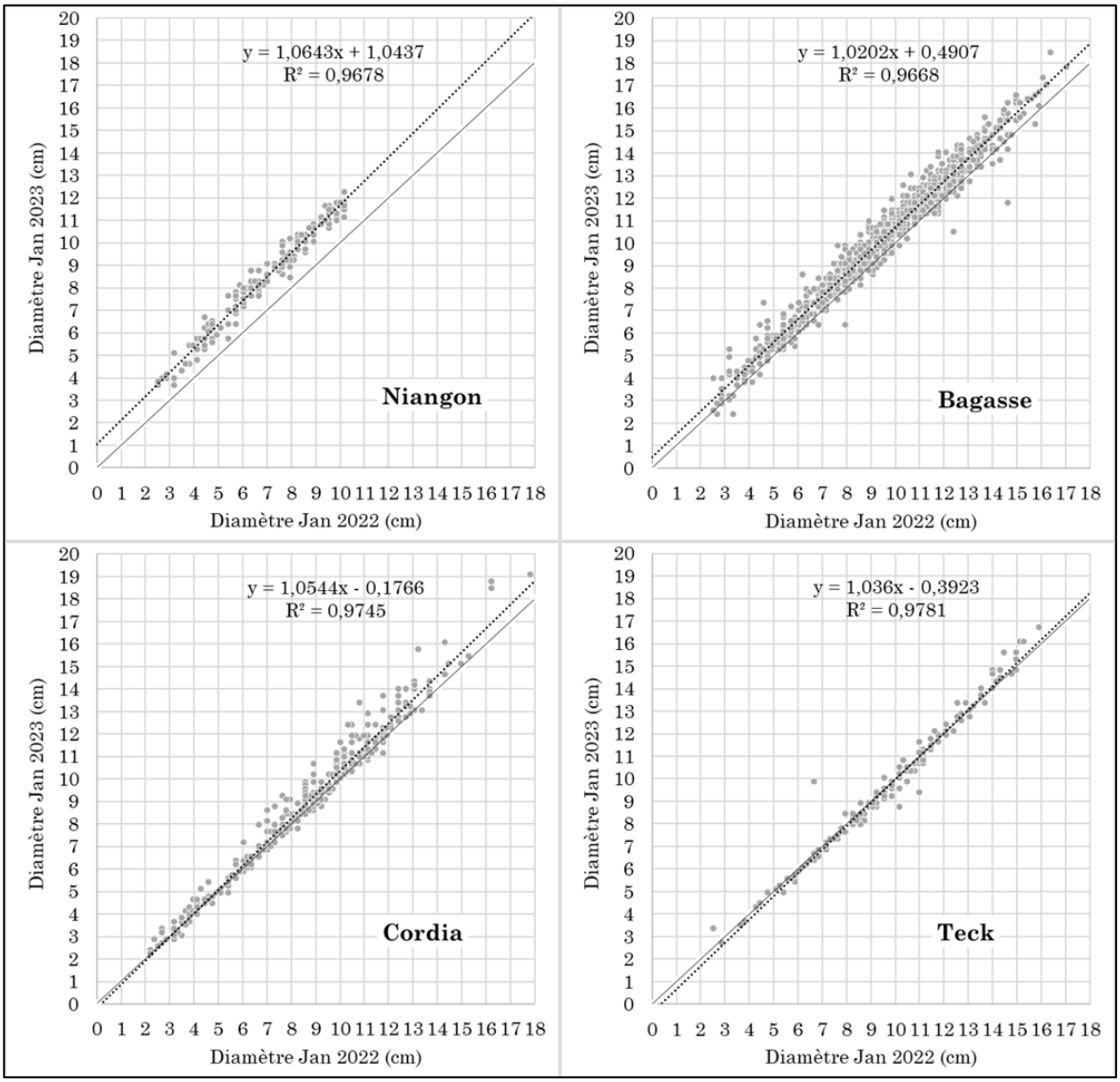


Fig. 53. Relation entre le diamètre du tronc à 1m30 (dbh) mesuré en janvier 2022 et le dbh mesuré en janvier 2023 pour les arbres vivants des 4 espèces plantées. Pour chaque graphe, un point représente un arbre. La ligne continue matérialise les cas théoriques pour lesquels le dbh n'aurait pas changé entre 2022 et 2023. La ligne en pointillés matérialise la relation observée entre les 2 valeurs de dbh.

La situation est assez similaire pour les Cordias en terme d'état sanitaire : cette espèce n'a pas plus apprécié les conditions pluviométriques difficiles de l'année 2022. En revanche, les accroissement diamétriques moyens (0 à 0,5 cm en 1 an ;

Fig. 53) sont significativement moins importants que ceux exprimés par les Bagasses. Néanmoins, les arbres avec des accroissement diamétriques > 2 cm en 1 an ne sont pas rares.

Pour finir, l'état sanitaire des tecks est dramatique puisque nous n'observons plus d'arbres sains (point bleu, Fig. 52). Les accroissement diamétriques moyens (0 cm en 1 an ; Fig. 53) sont cohérents avec l'aspect des arbres qui expriment même des accroissements négatifs en raison d'un état avancé de dépérissement.

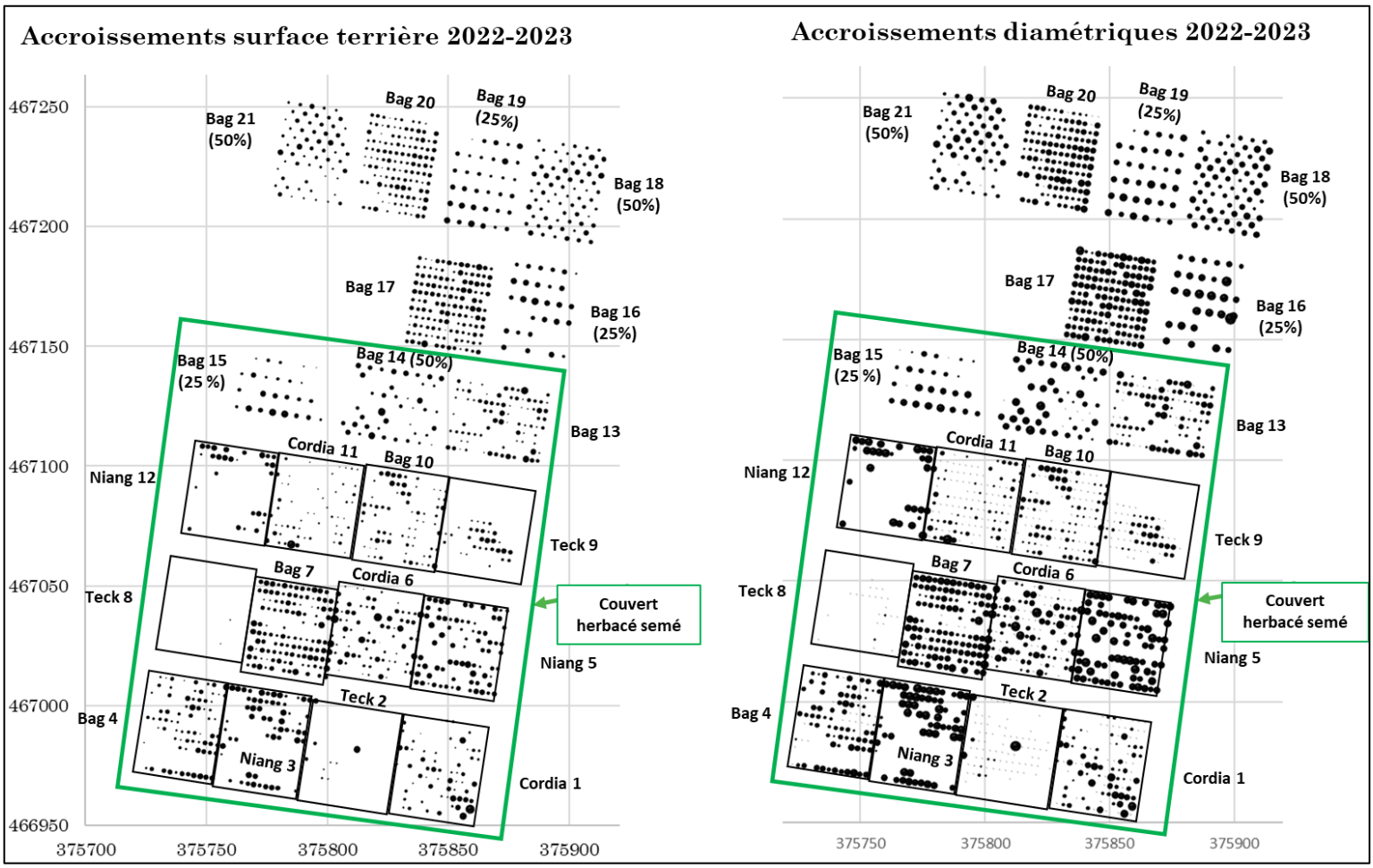


Figure complémentaire. Accroissements en surface terrière et accroissements diamétriques entre Jan 2022 et jan-2023 sur la parcelle de Regina (5ème année de croissance après plantation). Chaque point est un arbre vivant en janvier 2023. La taille des points est proportionnelle à la valeur d'accroissement. Bag. : bagasse ; Niang. : Niangon.

F/ Synthèse.

Bagasses. Ce sont les bagasses qui ont eu le comportement le plus régulier et les meilleurs résultats sur la parcelle de Regina. Certaines d'entre elles ont eu à souffrir de la pluviométrie importante lors de la plantation (environ 600 mm/mois), révélant sa sensibilité à l'excès d'eau et au mauvais drainage du sol, ainsi que la concurrence forte pour l'eau imposée par le couvert herbacé de *S. guianensis* dès la première grande saison sèche. Néanmoins, la grande majorité d'entre elles s'est

rapidement installée et a développé des taux de croissance en hauteur importants (2 à 3 m par an) qui se maintiennent avec le temps et qui ont placées les arbres hors d'atteinte du recru, mais aussi du couvert herbacé devenu bénéfique à la croissance des bagasses associées. La croissance en hauteur étant optimale dans la parcelle, les bagasses saines et bien conformées sont nombreuses et plutôt bien réparties sur le site.

Cordias. Les Cordias originaires de Colombie (Armeria, province du Quindio) montrent des résultats plus modestes, bien que certains arbres connaissent un développement remarquable. En effet, ils expriment des taux de croissance moyens plus faibles que ceux de la Bagasse (1,5 à 2,5 m/an). Leur croissance en hauteur semble aussi marquer le pas en 2022 (1,3 m/an). Enfin, ils sont plus sensibles aux conditions édaphiques assez variables sur la parcelle en montrant des développements divers, parfois assez bas sur certaines zones plus contraignantes. Compte tenu de la connaissance des capacités hors normes de développement de cette espèce dans d'autres régions (Costa Rica, Equateur), et sans remettre en question l'adaptabilité de cette espèce aux conditions guyanaises, une réelle interrogation émerge sur la productivité à moyens termes de cette essence en plantation en Guyane.

Tecks. Les Tecks suscitent l'étonnement et le questionnement au terme de 50 mois d'observations. Après avoir montré des taux de croissance remarquables (>4 m/an), cette espèce est en déclin sur la parcelle de Regina ! Sensibilité aux conditions de mauvais drainage, à la compaction du sol… Le déclin d'une des 3 parcelles a été particulièrement précoce en zone d'hydromorphie temporaire. Si un temps, les blocages de croissance en hauteur ont pu être expliqués par un développement racinaire profond insuffisant et exposant les arbres au stress hydrique en grande saison sèche, le fait que l'ensemble des tecks finisse par décliner suscite une interrogation sur l'adaptabilité du Teck aux conditions pédoclimatiques de la parcelle de Regina : excès manifeste d'eau ces 2 dernières années (2021, 2022) et caractères physico-chimiques des sols du site. Aucun de ces 2 paramètres n'est exclus.

Niangons. Les Niangons suscitent aussi l'étonnement. Après avoir subi une mortalité dramatique lors du passage de la première grande saison sèche, les effectifs sont maintenant constants et les Niangons connaissent des développements exceptionnels tant en hauteur (> 3 m) qu'en conformation, malgré l'excès d'eau de ces 2 dernières années 2021 et 2022. L'absence de zonation de croissance au sein du peuplement survivant exclue l'idée que ce comportement soit le fait exclusif de la survie d'individus « + ». Il nous semble qu'à Regina, l'origine de la mortalité apparait comme la conjoncture de plusieurs paramètres ayant conduit à un enracinement insuffisant des plants au cours des 6 premiers mois qui ne permettait pas de survivre en grande saison sèche : une pluviométrie exceptionnelle, un compactage de surface (covercrop en saison des pluies) et la présence du couvre sol de *S. Guianensis*. Plusieurs éléments nous amènent à penser aujourd'hui que l'absence d'un de ces 3 paramètres (pluviométrie plus

basse, ou absence de *S. Guianensis*, ou travail du sol hors saison des pluies) sur le site de Regina aurait permis d'éviter cette mortalité dramatique à l'installation. Deux de ces 3 paramètres sont contrôlables : (i) absence de *S. Guianensis* et (ii) travail du sol hors saison des pluies.

Pois sucré. *Inga edulis* est l'espèce qui a le plus souffert de son installation sur la parcelle de Regina. Les effectifs de cette espèce déclinent régulièrement sans qu'aucune zone ne lui semble vraiment favorable. Il est utile de rappeler aussi que c'est la seule espèce qui n'a bénéficié ni d'une fertilisation de fond, ni de fertilisation de surface à la plantation. Il faut savoir aussi que les sols de la parcelle renferment une grande quantité de pisolithes vers 30 cm de profondeur qui constituent autant d'obstacle à la progression des racines, mais induisent aussi une moindre réserve en eau des couches de sols de surface. Pour cette espèce qui apprécie l'eau, nous pensons que l'apport d'engrais aurait activé le passage racinaire de cette couche de sol pisolitique à la rétention en eau plus faible que les autres couches et aurait permis aux arbres d'échapper à un stress hydrique sévère dès la première saison sèche. Et visiblement, le temps n'y a rien fait puisque les effectifs ne cessent de baisser.

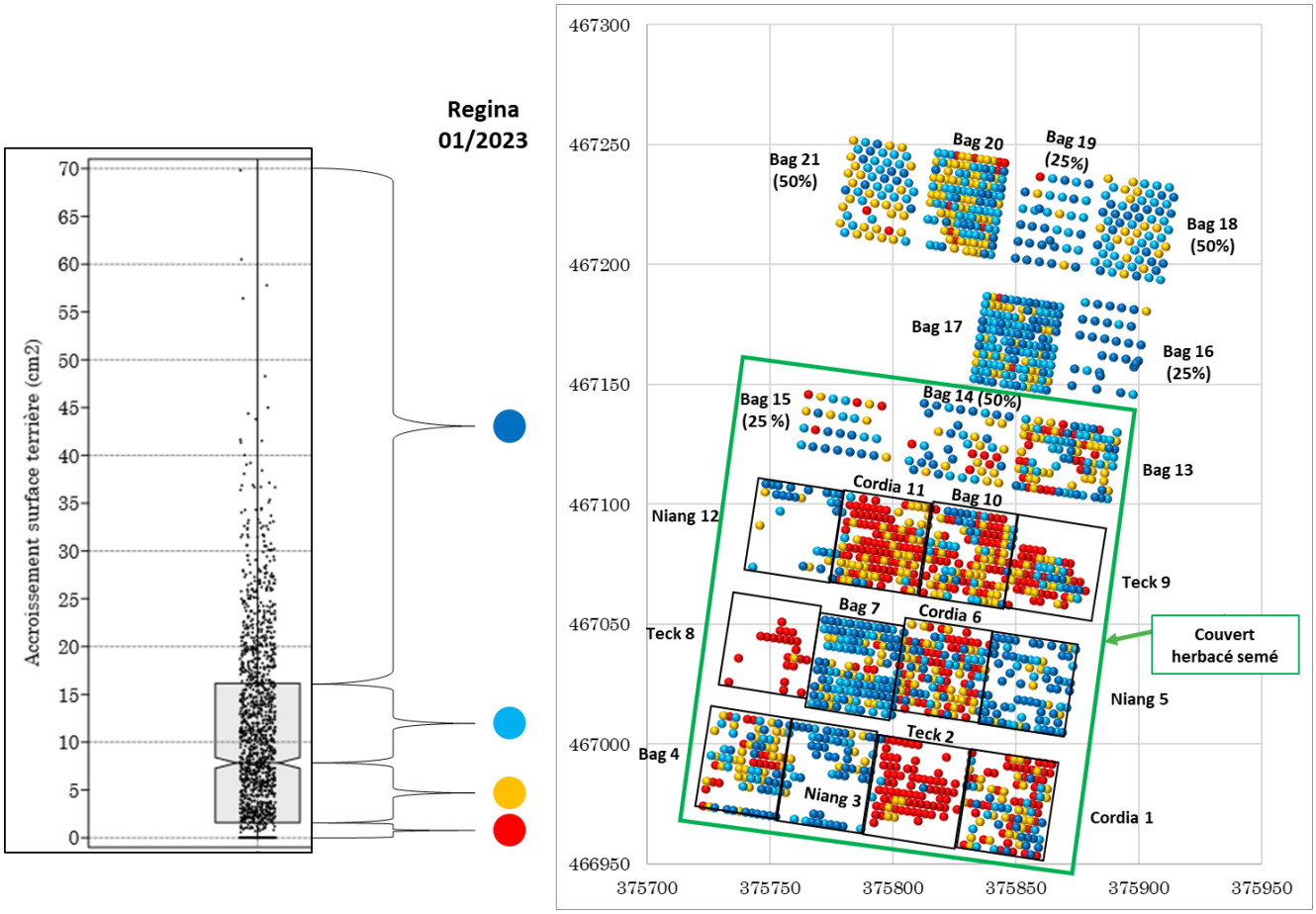


Figure complémentaire. Accroissements en surface terrière sur la parcelle de Regina entre Janvier 2022 et janvier 2023 (4-5 ans après plantation). La couleur d'un point renseigne sur la classe d'accroissement d'un arbre vivant en 2023. Bag. : bagasse ; Niang. : Niangon.

2 - Le site de Paracou.

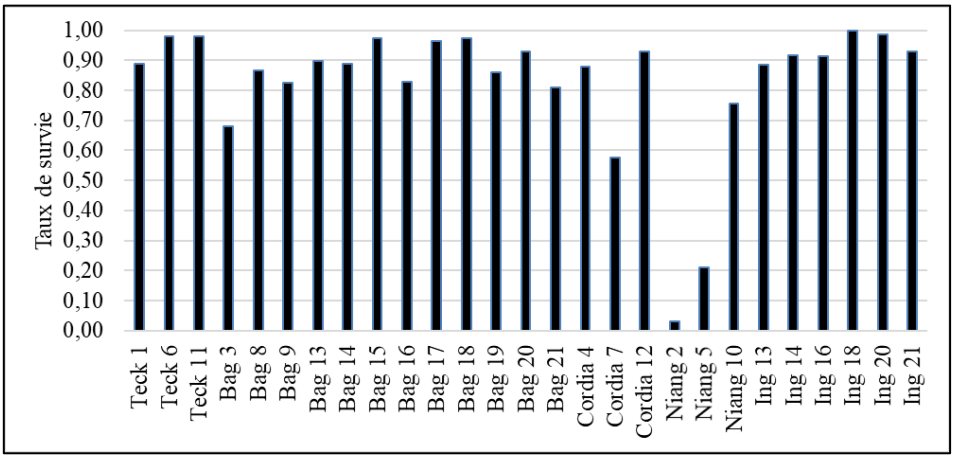
Fig. 54. Organisation générale de la parcelle de Paracou à 35 mois. Les nombres en abscisse et en ordonnée sont des mètres (projection transverse universelle de Mercator pour la Guyane ; UTM Nord fuseau 22). Chaque point noir représente un arbre planté encore vivant. La taille du point est proportionnelle à la hauteur totale de l'arbre. Chaque intitulé indique le nom vernaculaire de l'espèce ainsi que le numéro de la placette. Bag : Bagasse ; Niang : Niangon ; Ing : Inga. Les intitulés en fond vert indiquent la présence du couvert herbacé semé lors de la préparation de la parcelle.

La figure 54 présente la parcelle de Paracou à 35 mois (dernier inventaire : octobre 2021). Elle rend compte de la hauteur totale et de la survie des arbres dans les 21 placettes. Cette parcelle est constituée de 2 grands blocs : un bloc sud constitué de 12 placettes comparant les 4 espèces forestières plantées avec ou sans couvre sol

herbacé, et un bloc nord constitué de 9 placettes plantées soit de bagasses (Bag 100%), soit d'un mélange Bagasse-Inga (Bag 50% = Ing 50% ; Bag 25% < Ing 75%).

A/ Taux de survie, taux de mortalité et état sanitaire.

Que ce soit après 25 mois ou 35 mois de développement, le taux de survie global reste élevé sur la parcelle (0,8 ; Fig. 55). Seules 4 placettes sur les 21 ont un taux de survie inférieur à 0,7. Les 2 plus basses valeurs (< 0,3) sont observées chez le Niangon (Niang 2 et Niang 5). Les 2 autres valeurs (> 0,5) sont observées chez la Bagasse (Bag 3) et le Cordia (Cordia 7), mais elles sont supérieures à 0,5. Ce taux de survie a toutefois significativement diminué entre 25 et 35 mois pour les placettes Cordia 12 (0,93 à 0,79) et Niang 10 (0,75 à 0,53), 2 placettes qui subissent des attaques de fourmis manioc.



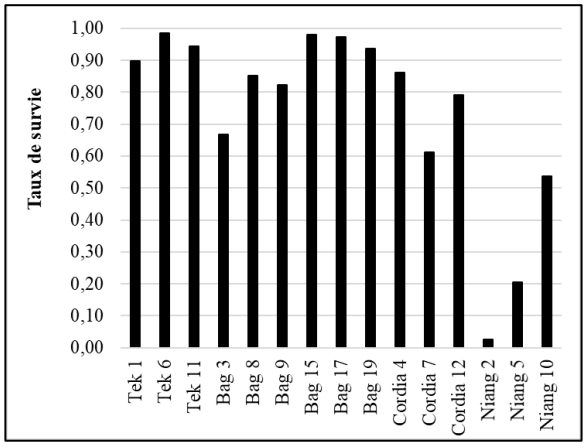


Fig. 55. Taux de survie à 25 mois (au-dessus) et à 35 mois (à gauche) des arbres pour les 5 espèces plantées sur la parcelle de Paracou. Chaque intitulé indique le nom vernaculaire de l'espèce ainsi que le numéro de la placette. Bag : Bagasse ; Niang : Niangon ; Ing : Inga.

La mortalité sur le dispositif de Paracou (Fig. 56) est relativement constante au cours du temps pour les Ingas (0,7 arbres par mois sur l'ensemble du dispositif), le Teck (1,4 arbres/mois), les Cordias (4,8 arbres/mois) et les Bagasses (6,2 arbres/mois). En revanche pour le Niangon, elle a été enregistrée comme très forte avec près de 20 arbres morts par mois entre le mois de juin 2019 et le mois de janvier 2020. Entre ces 2 dates, l'existence de la grande saison sèche pourrait expliquer cette augmentation brutale.

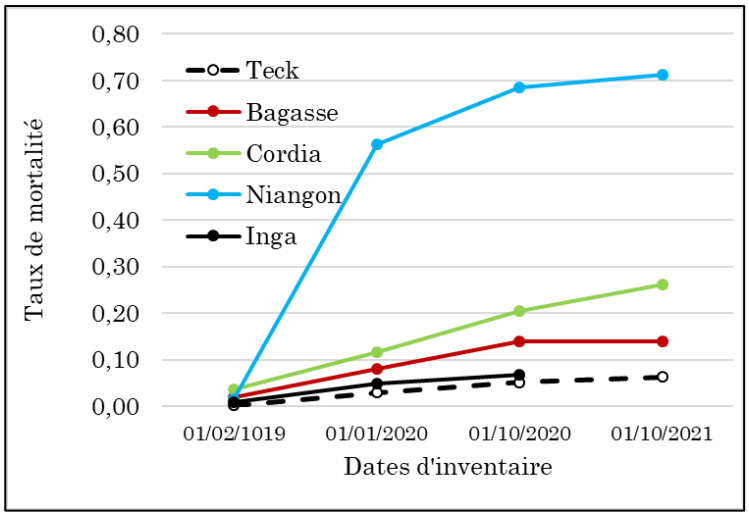


Fig. 56. Evolution du taux de mortalité au cours du temps pour les 5 espèces plantées sur la parcelle de Paracou.

B/ Hauteurs, diamètres et taux de croissance.

La figure 57 montre la croissance en hauteur des arbres relevés comme disparus de la parcelle de Paracou à 23 mois (inventaire d'octobre 2020). Exceptés quelques tecks dépassant la hauteur moyenne de100 cm, la croissance des arbres qui vont disparaître est généralement très lente avec une hauteur moyenne atteinte de 70 cm de haut. Ainsi, les arbres qui survivront après 12 mois sont en moyenne bien plus hauts que ceux relevés comme morts à 12 mois : 160-250 cm pour le Teck, 150-230 cm pour la Bagasse, 110-170 cm pour les Cordias et 50-100 cm pour le Niangon.

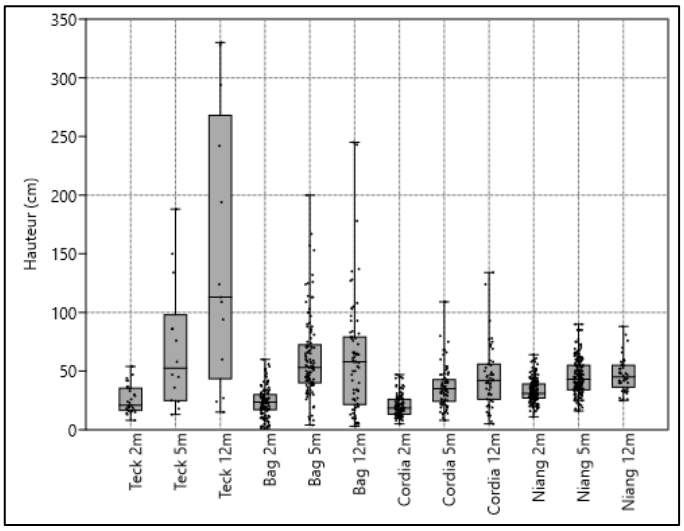


Fig. 57. Evolution de la hauteur des arbres relevés comme disparus de la parcelle de Paracou à 23 mois (dernier inventaire d'octobre 2020) pour 4 espèces plantées sur le dispositif de Paracou. Inga ne figure pas car la mortalité est très faible pour cette espèce.

La figure 58 rend compte de l'état sanitaire des arbres à l'échelle de la parcelle après 35 mois de croissance. A la différence de la parcelle de Regina, toutes les espèces montrent des individus en difficulté. C'est le teck qui est l'espèce la plus affectée. Puis viennent les Cordias, tandis que la Bagasse reste l'espèce la moins affectée. Etonnamment, ce sont les zones situées tout autour de la zone de plus forte mortalité (zone d'hydromorphie temporaire) qui montre le plus d'individus sains. Sur cette carte, les Inga ne sont pas figurés car les placettes n'ont pu être inventoriées, mais cette espèce semblait très bien se comporter.

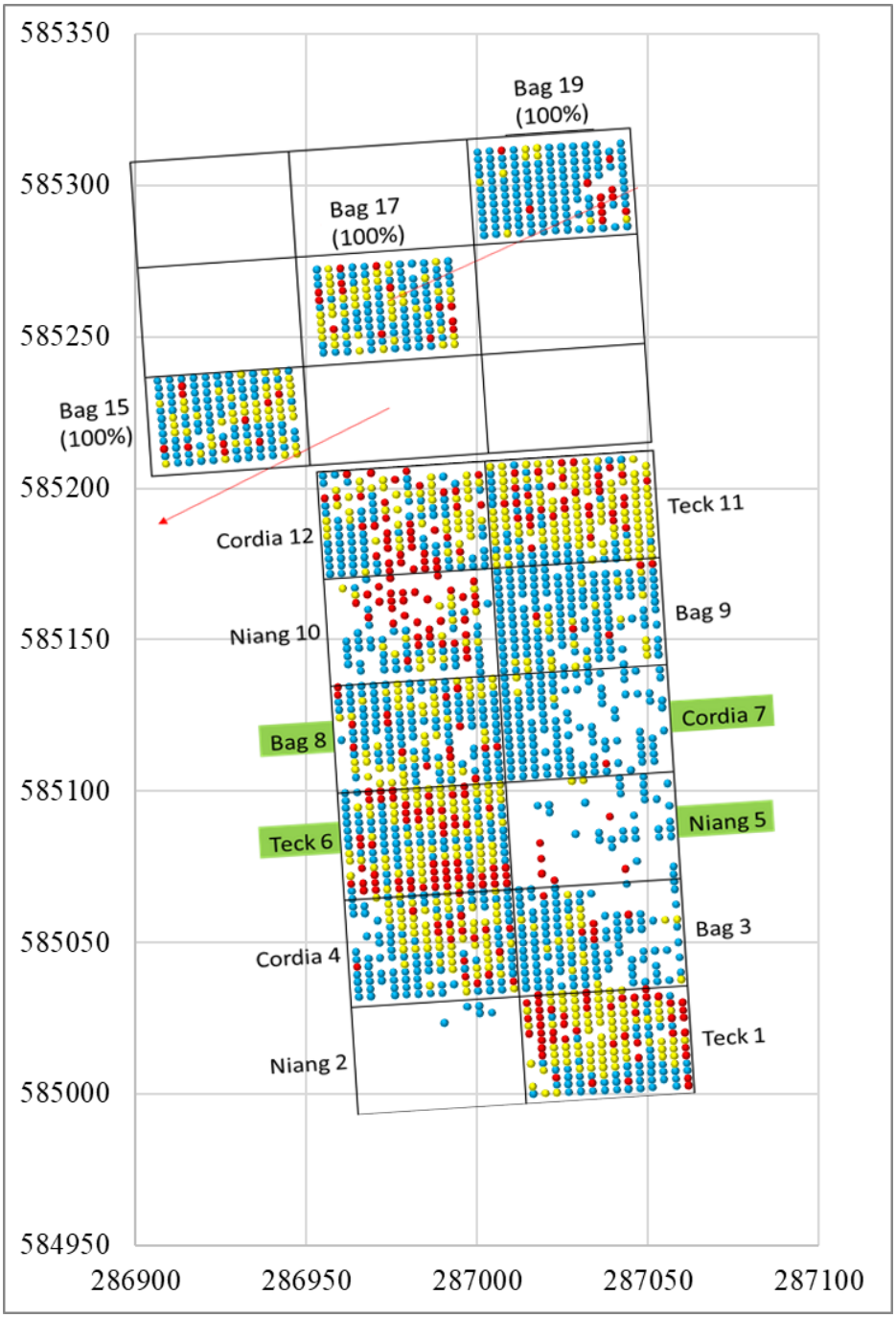


Fig. 58. Répartition des arbres sains (bleu), en souffrance (orange) ou dépérissant (rouge) dans la parcelle de Paracou. Chaque point est un arbre vivant, les vides, des arbres morts. Attention : 6 placettes du bloc nord ne sont pas décrites ! Chaque intitulé indique le nom de l'espèce ainsi que le numéro de placette. Bag : Bagasse ; Niang : Niangon. Les intitulés en fond vert indiquent les placettes avec couvre-sol herbacé semé.

Le dernier inventaire (35 mois) révèle une forte hétérogénéité de hauteur (Fig. 59) à l'échelle de la parcelle ou de la placette. Exprimé en taux de croissance annuelle, la plus forte valeur médiane est observée chez des Bagasses avec 14 cm/mois (contre 20 cm/mois pour des Bagasses sur le site de Regina) : la croissance est bien moins intense à Paracou qu'à Régina. Au niveau spécifique, ce sont les tecks, les bagasses et les Cordias qui présentent les hauteurs moyennes les plus importantes, respectivement comprises entre 327 et 400 cm, entre 300 et 500 cm, et entre 330 et 400 cm. Les Niangons sont les plus petits arbres du dispositif avec une hauteur moyenne comprise entre 250 et 350 cm.

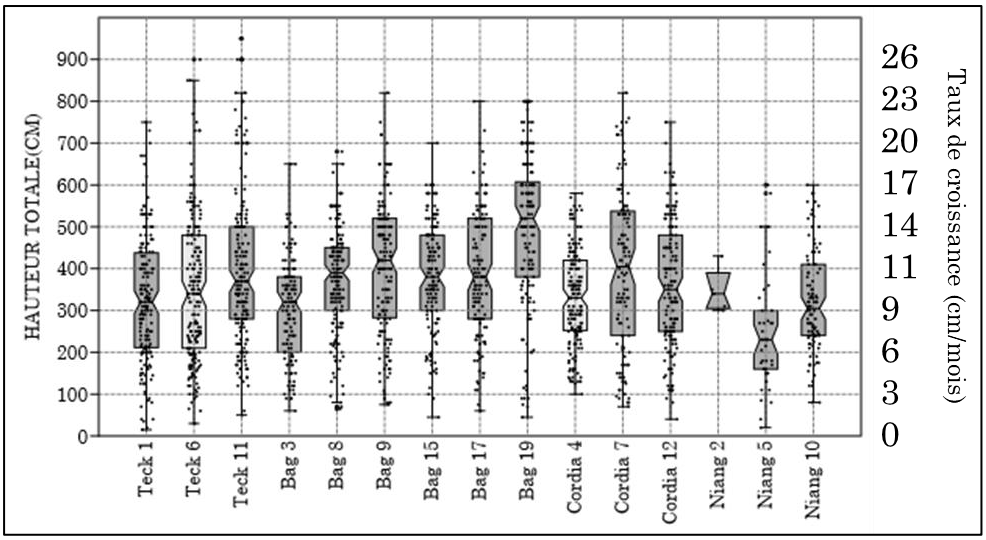


Fig. 59. Box plots de la hauteur totale (cm) et du taux de croissance (cm/an) des arbres à 35 mois de développement pour les 5 espèces de la parcelle de Paracou. En abscisse : nom vernaculaire et numéro de la placette. Bag : Bagasse ; Niang : Niangon ; Ing : Inga.

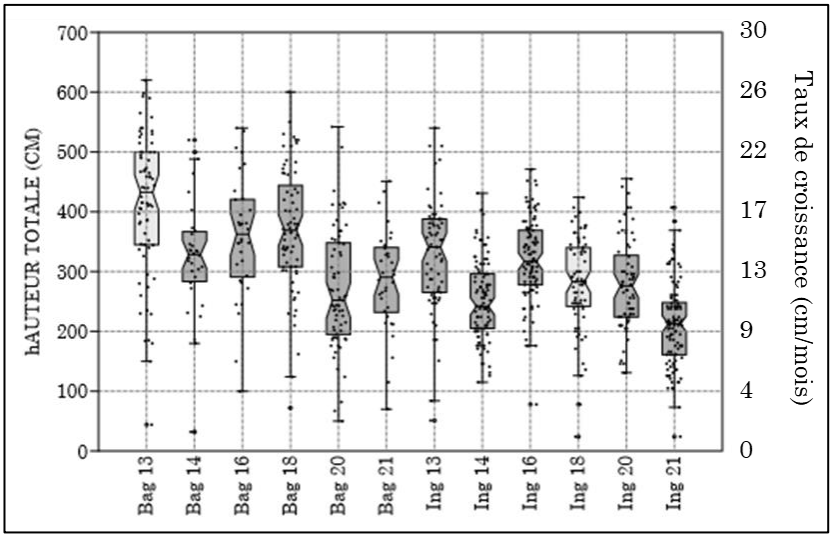


Fig. 60. Box plots de la hauteur totale (cm) et du taux de croissance (cm/an) des arbres plantés à 23 mois de développement pour 2 espèces de la parcelle de Paracou. Bag : Bagasse ; Ing : Inga.

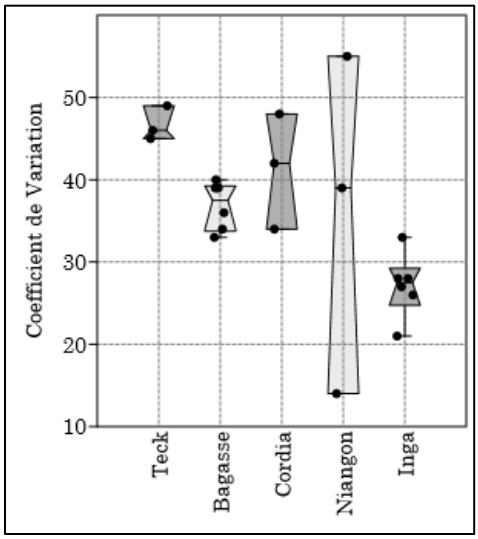


Fig. 61. Coefficient de variations de la hauteur totale des arbres à 35 mois de développement après plantation pour les 5 espèces dans les placettes de la parcelle de Paracou. Chaque point représente une placette.

Ce sont les Ingas qui se portent très bien sur la parcelle qui montrent les plus faibles valeurs de coefficient de variation (Fig. 61 ; CV) autour de 28%, tandis que ce sont les Tecks qui ont les plus fortes valeurs (~46%). Les Bagasses montrent des valeurs étroitement regroupées autour de 38%. Niangons et Cordias montrent des valeurs très dispersées en précisant que les Niangons ont aussi subi de lourdes attaques de fourmis manioc qui ont annihilé une placette (Niang 2).

Le facteur « espèce » ou origine, susceptible de masquer l'effet des conditions de environnementales (sol, fertilité, autre), peut être en partie masqué par une normalisation du facteur « hauteur » par exemple. Ainsi, pour chaque espèce et pour chaque origine (clone, origine géographique), nous avons recherché la plus grande valeur de hauteur totale atteinte H_{sp}. Puis, pour chaque plant de chaque espèce de chaque origine, nous avons calculé le rapport entre la hauteur totale h du plant et cette plus grande valeur de hauteur atteinte H_{sp}. : h/H_{sp}. La valeur de ce rapport est comprise entre 0 et 1 pour tous les individus de toutes les espèces. Cette normalisation permet de mesurer le succès de chaque individu quelle que soit leur appartenance spécifique et de rendre compte des zones dans lesquelles les plants se sont le mieux développés (Fig. 62).

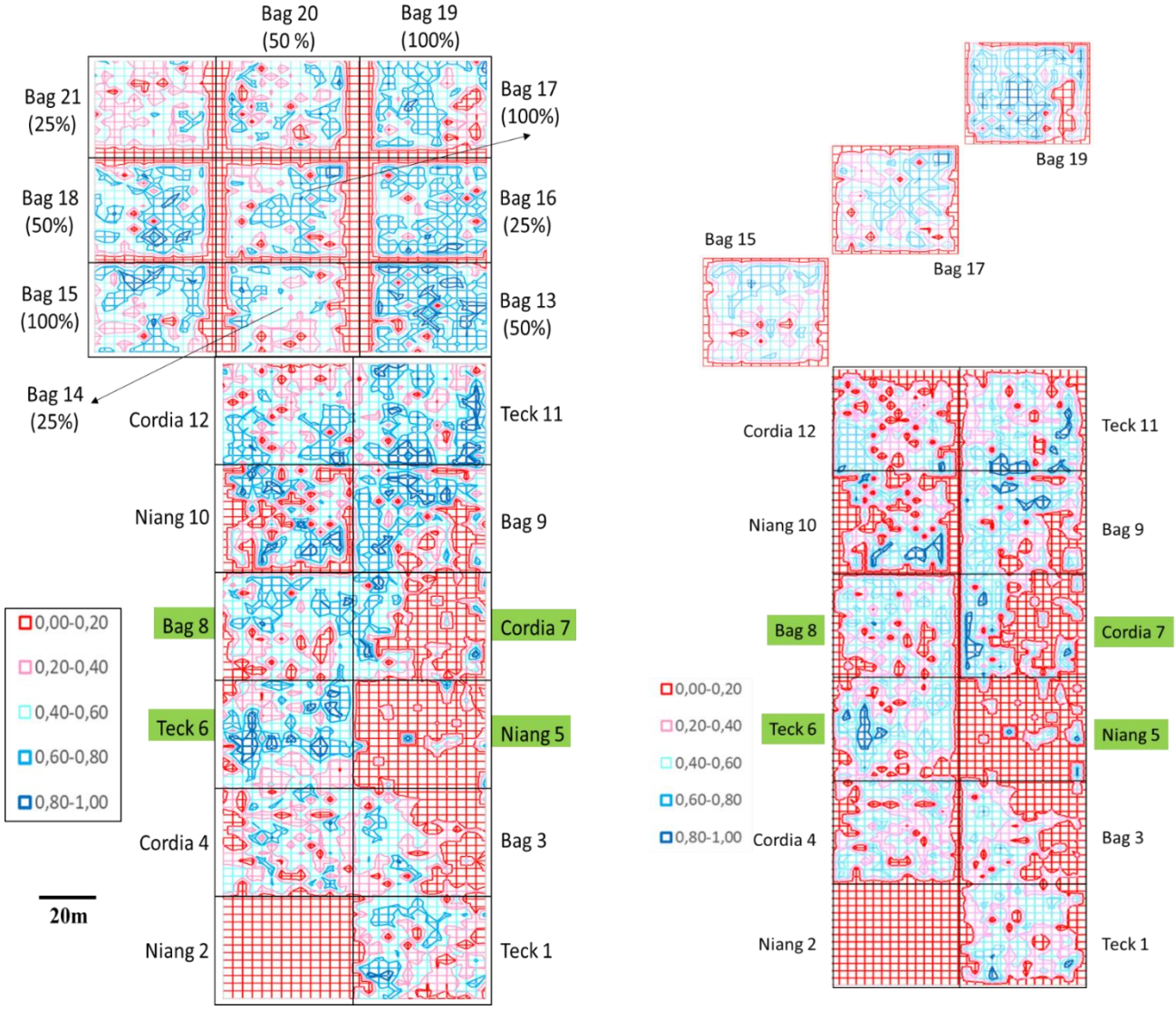


Fig. 62. Hauteur relative des plants sur la parcelle de Paracou à 23 mois (à gauche) et 35 mois (à droite). L'échelle de couleur représente 5 classes différentes pour h/H_{sp} compris entre 0 et 1. Chaque intitulé indique le nom vernaculaire de l'espèce ainsi que le numéro de la placette. Bag : Bagasse ; Niang : Niangon ; Ing : Inga. Les intitulés en vert indiquent la présence du couvert herbacé semé.

La figure 62 rend compte de la variabilité de hauteur totale relative sur la parcelle. Nous pouvons formuler diverses remarques :

1) De grandes zones rouges qui indiquent de très faibles valeurs : ce sont des zones de forte mortalité (bloc sud) ou bien des zones non plantées (bloc nord).
    - La placette Niang 2 a été détruite par des fourmis manioc peu de temps après la plantation.
    - Les placettes Bag 3, Niang 5, Cordia 7 et Bag 9, toutes voisines et situées en milieu de versant, ont subi une forte mortalité bien qu'elles n'aient pas subi d'attaques de fourmis manioc, ce qui laisse entrevoir un effet du sol et/ou un effet de la topographie.
    - Niang 5 et Cordia 7 sont recouvertes d'un couvert herbacé semé de *Stylosanthes guianensis*. Toutefois, d'autres placettes voisines Teck 6 et Bag 8, aussi recouvertes de *Stylosanthes guianensis*, n'expriment pas une mortalité aussi élevée. Elles sont aussi situées en haut de versant.
2) Les zones où prédominent bleu pâle et rose indiquent des zones où les arbres ont nettement bien moins poussé qu'ailleurs.
    - Les placettes Teck 1 et Cordia 4 ont fait l'objet d'attaques plus ou moins récurrentes de fourmis manioc.
    - Les placettes Bag 20, Bag 21 ainsi qu'une zone commune à Bag 14 et Cordia 12 n'ont pas subi d'attaque de fourmis manioc. Elles sont aussi situées sur des versants, ce qui laisse entrevoir un effet du sol.
3) Les zones marquées de bleu foncé et très foncé indiquent des zones où les arbres ont atteint les plus grandes hauteurs. Les placettes qui en ont le plus sont généralement des placettes voisines, quelle que soit l'espèce accueillie. Un « axe de forte croissance » se dégage, séparant la zone de forte mortalité dans la partie est du bloc sud et la zone de faible croissance au coin nord-est du bloc nord. Un important effet du sol et/ou de la topographie est donc suspecté.

Ce sont ainsi différents paramètres qui modulent la croissance des arbres : tempérament spécifique, prédateurs et conditions pédoclimatiques locales. Sur la figure 62, la carte de droite rend compte de la variabilité de hauteur totale relative à 35 mois sur la parcelle. En comparaison des résultats de l'inventaire à 23 mois, la carte montre que le motif bleu foncé est moins présent à 35 mois, signe qu'il existe plus d'écart entre le plus grand individu et les autres individus appartenant à la même espèce et la même provenance. Sans exclure une croissance soutenue de « l'arbre dominant », **le ralentissement généralisé de la croissance des autres arbres est observé sur cette parcelle de Paracou**.

Pour ce qui concerne les tecks, si les taux de survie très hauts ($0,88 \leq x \leq 0,98$) à 35 mois ne permettent pas de discerner de différence significative de comportement entre placettes, en revanche la croissance le permet (Fig. 63). C'est la placette

« Teck 11 » qui a les taux de croissance les plus soutenus depuis la plantation bien que ces taux aillent en diminuant. Ce tassement des taux de croissance est manifeste dès la seconde année pour la placette « Teck 6 » située en haut de versant et aussi couverte de *S. guianensis* semé. Après 3 ans de croissance après plantation, les taux de croissance médians déclinent sur les 3 placettes de Tecks tandis que certains individus, isolés ou en petits groupes, peuvent montrer des taux remarquables (Fig. 63 ; Teck 6 et 11).

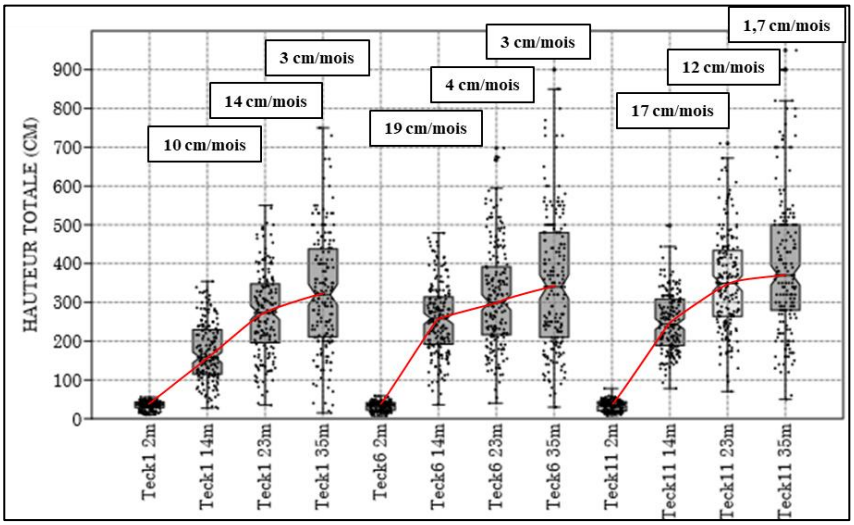


Fig. 63. Hauteur totale des tecks sur les 3 placettes Teck 1, Teck 6 et teck 11 à différentes dates d'inventaire (à 2, 14, 23 mois et 35 mois ; respectivement 2m, 14m, 23m et 35m). Les taux de croissance mensuels (cm/mois) sont indiqués pour chaque placette et pour chaque période de croissance achevée par un nouvel inventaire.

Il est utile ici de préciser qu'après 20 mois, le mode d'entretien a changé, passant d'un entretien manuel « ciblée » à un entretien mécanique intégrale : la brusque suppression intégrale du recru a induit une recrudescence des attaques de fourmis ! Par la suite, la parcelle n'a pu être entretenue correctement (intervention partielle d'un girobroyeur) laissant progresser dangereusement le recru naturel. Depuis, les attaques des fourmis manioc bien installées sur la parcelle ne cessent plus, notamment sur les tecks de la placette 11 dont la plupart ne poussent plus en hauteur (Fig. 63).

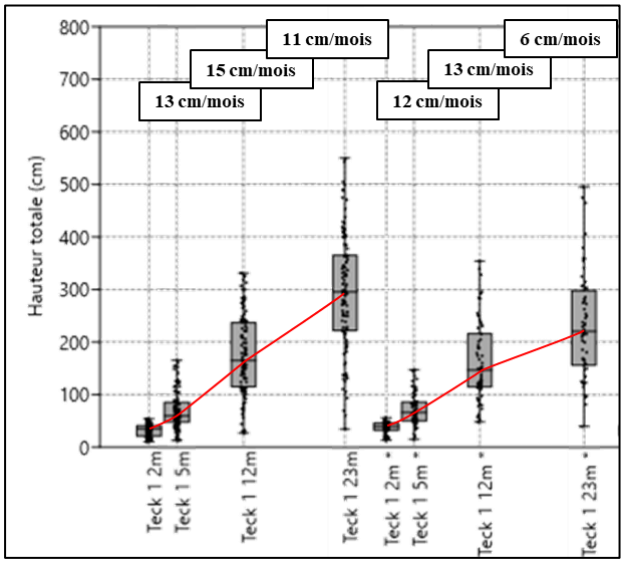


Fig. 64. Hauteur totale des tecks à 23 mois sur la placette Teck 1 subdivisée en 2 partie : une partie regroupant les plants attaqués par des fourmis manioc (*) et une partie regroupant les tecks épargnés.

La placette « Teck 1 » située en milieu de versant a été attaquée par les fourmis manioc dès la plantation. Sur la période d'étude, ce sont 67 tecks (34 %) de cette placette qui ont été attaqués. Ces tecks (Fig. 64, *) ont une croissance en hauteur significativement moindre que celle des plants épargnés. La différence se manifeste surtout au cours de la 2ème année. Quoi qu'il en soit, malgré l'absence de prédation, les tecks indemnes de cette placette

montrent tout de même un retard de croissance qui a pour origine une croissance initiale plus lente que celle observée pour les plants des autres parcelles (Fig. 64), vraisemblablement en raison de condition de sols moins fertiles.

Pour les bagasses en placeaux pures, d'une manière générale après 35 mois (Fig. 65), c'est le taux de croissance initial qui est le plus haut. Puis ce taux diminue graduellement. Par la suite, au cours de la seconde année (2020), ce taux peut encore diminuer ou bien augmenter comme cela est le cas pour le placeau 19.

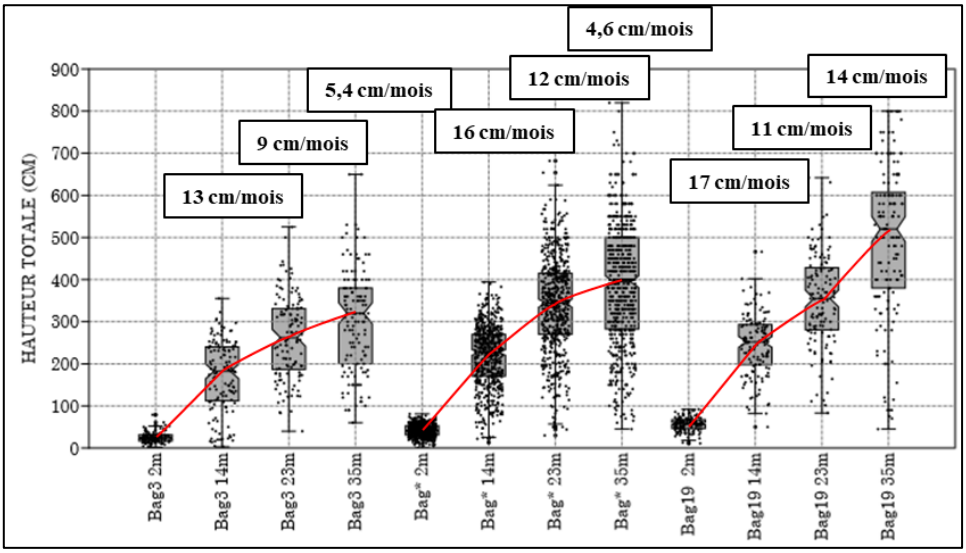


Fig. 65. Croissance en hauteur des Bagasses sur 35 mois dans 6 placettes subdivisées en 3 ensembles : Bag 3, Bag (Bag 8, 9, 15, 17) et Bag 19 à différentes dates d'inventaire (2, 14, 23 mois et 35 mois). Les taux de croissance mensuels (cm/mois) sont indiqués pour chaque placette et pour chaque période de croissance achevée par un nouvel inventaire.*

C'est la placette « Bag 3 » qui se démarque des autres avec le taux de survie le plus bas (57%), significativement diffèrent de celui des autres placettes (Fig. 65). Située en milieu de versant, c'est toute sa moitié la plus basse qui a subi une mortalité dramatique. Elle est située sur des sols hydromorphes ! En effet, la réalisation de sondages à la tarière a révélé des sols tachés de rouille dès 40cm. Il est aussi intéressant de souligner que (1) le mulch ne se décompose pas bien et recouvre toujours intégralement le sol, et (2) la repousse du recru est lente dans cette zone de mortalité. Malgré ce tri et le fait que les arbres restant soient situés plus hauts sur la pente, ce sont ceux qui présentent la hauteur totale médiane la plus faible (302cm, soit (5,4 cm/mois). Inversement pour la placette 19 (Fig. 65), située sur le même versant mais à l'autre extrémité du dispositif et dont la hauteur médiane est de 500cm à 35 mois (14,3 cm/mois). Les autres placettes, en situations intermédiaires et regroupées, ont des comportements intermédiaires.

Les autres 6 placeaux mixtes, non dégagés par le prestataire, n'ont pu être décrits en octobre 2021. La figure 66 présente leur croissance après 23 mois d'observation. La placette Bag 13 située dans la partie centrale de la parcelle et en milieu de versant montrait les meilleurs taux de croissance, tandis que les placettes Bag 20 et 21 (Bag+, Fig. 66) situées à la bordure nord de la parcelle montrent un tassement

significatif de la croissance cours de la 2ème année après une croissance initiale plutôt correcte. Les autres placettes (*Bag* :* Bag 14, 16 et 18) ont des comportements intermédiaires.

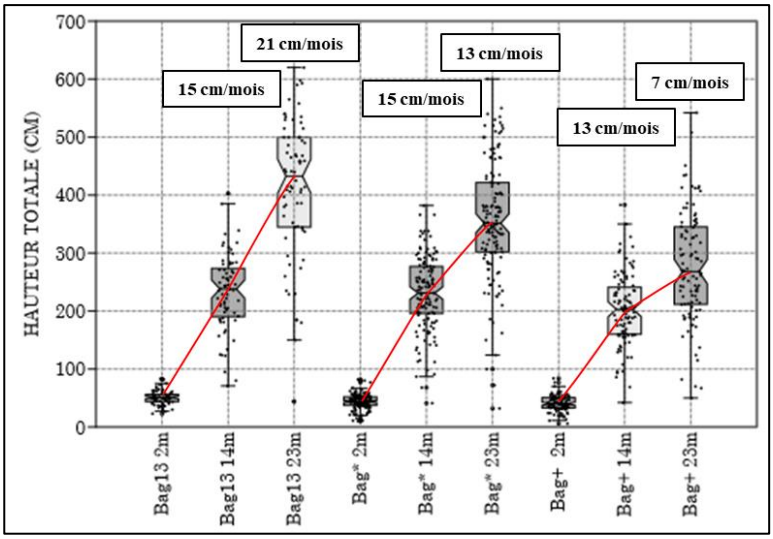
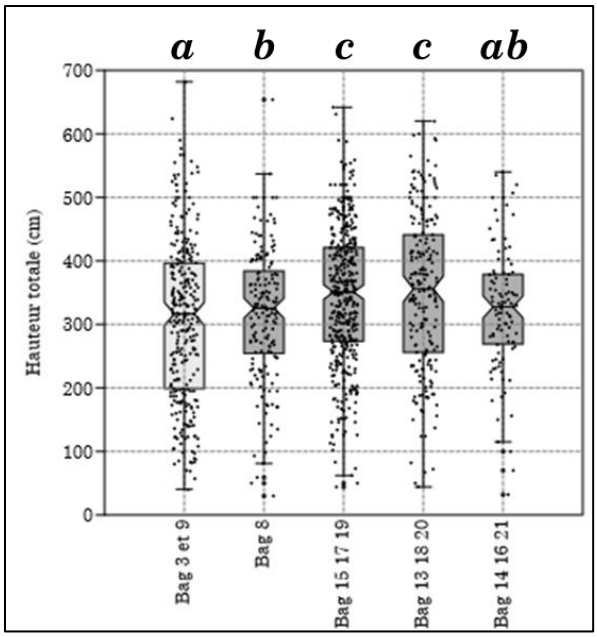


Fig. 66. Croissance en hauteurs des Bagasses sur 6 placettes non inventoriées à 35 mois. Elles sont regroupées en 3 ensembles : Bag 13, Bag [Bag 14, 16, 18] et Bag+ [Bag 20 et 21] à différentes dates d'inventaire (à 2, 14 et 23 mois).*



Une analyse de la hauteur totale à 23 mois en fonction de l'association avec des Ingas montre qu'il n'y a aucun effet particulier de la proximité des Ingas sur le développement des Bagasse.

Fig. 67. Hauteur totale des Bagasses en fonction de leur situation dans la parcelle et de l'association ou non avec Inga. « Bag 3 et 9 » sont des 2 placettes pures du bloc sud ; « Bag 8 » est une placette pure du bloc sud avec S. guianensis ; les autres ensembles font partie du bloc nord associant Inga ou non : « Bag 15 17 19 » sont 3 placettes pures ; « Bag 13 18 20 » sont 3 placettes mixtes 50/50 et « Bag 14 16 21 » sont 3 placettes mixtes 25/75. Les box plots avec la même lettre n'ont pas de médianes significativement différentes.

<u>Pour les Cordias</u>, C'est la placette Cordia 7 qui se démarque des autres avec le taux de survie le plus bas taux (61% ; Fig. 68), significativement différent de celui des autres placettes. Située en milieu de versant, c'est toute sa moitié la plus basse qui a subi une forte mortalité en raison de sols à hydromorphie temporaire doublée d'une compétition avec *S. Guianensis*. Sur ce placeau, la variabilité est très grande avec des grands individus situés sur la crête (Fig. 68 ; Cordia 7*) et de plus petits individus plus bas sur la pente (Fig. 68 ; Cordia 7+). C'était la placette Cordia 12 située en sommet de versant et milieu de parcelle qui avait les taux de croissance

les plus soutenus. Ce n'est plus le cas en 2021, année durant laquelle, la croissance s'est nettement tassée. Il faut ajouter que les arbres sont aujourd'hui envahis par le recru et qu'ils subissent des attaques régulières de fourmis manioc. Les plants de la placette Cordia 4 située en haut de versant, dans la partie sud de la parcelle, ont eu des taux de croissance intermédiaires sans distinction significative entre plants attaqués par des fourmis manioc et plants épargnés.

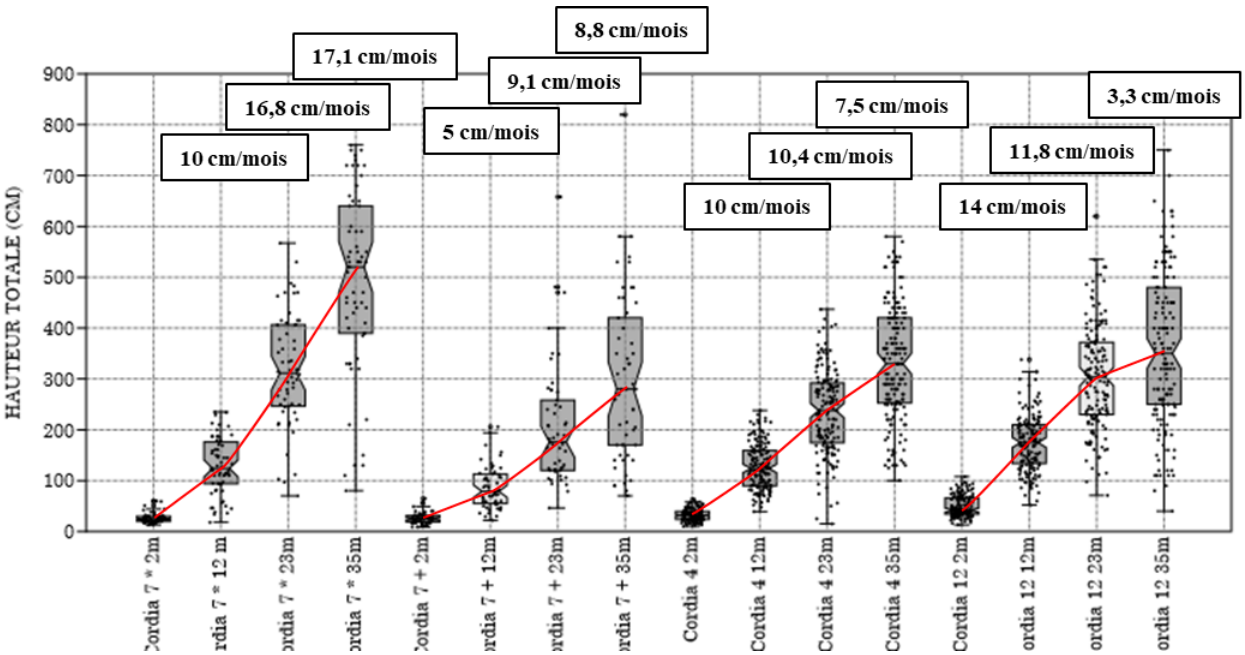


Fig. 68. Hauteurs totales des Cordias sur les 3 placettes plantées (Cordias 4, 7 et 12) à différentes dates d'inventaire (à 2, 12, 23 et 35 mois ; respectivement 2m, 12m, 23m et 35m). Cordia 7 regroupe des individus de la placette 7 a priori épargnés par les fourmis manioc, tandis que Cordia 7+ regroupe le reste des arbres de cette placette.*

Une analyse de la hauteur totale au terme de 35 mois de croissance montre que les arbres originaires du Costa Rica sont significativement plus hauts que ceux originaires de Saul (Fig. 69) sauf pour la placette 4.

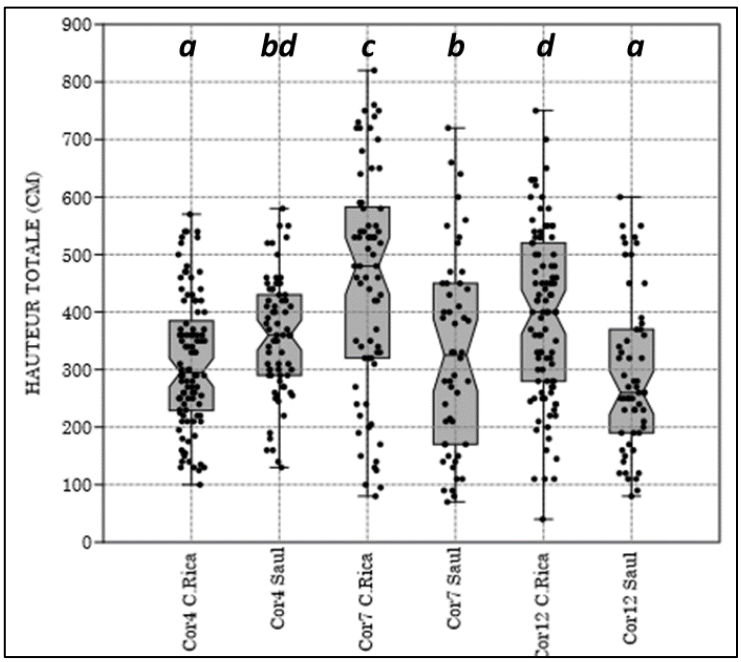


Fig. 69. Hauteurs totales pour les 2 origines différentes de Cordias, Costa Rica (C.Rica) et Saul, sur les 3 placettes plantées (Cord4, Cord7 et Cord12). Les box plots ayant la même lettre n'ont pas de médianes significativement différentes au seuil de 5% (Mann-Whitney test).

Pour les Niangons, la placette Niang 2 a été quasi intégralement détruite par des attaques de fourmis manioc dès la plantation. Toutefois, nous continuons de mesurer les quelques individus pour capitaliser des données rares pour cette espèce. Seules les 2 autres placettes 5 et 10 subsistent. La placette Niang 5 située en milieu de versant et couverte de *S. guianensis* semé, se démarque de la placette 10 par un taux de survie très bas (0,21). En revanche, la placette Niang 10 garde un taux de survie plus conséquent de 0,53.

C'est la placette Niang 10, située en sommet de versant, qui a montré d'emblée les plus forts taux de croissance (Fig. 70). Toutefois, les taux de croissance en hauteur sont maintenant stables autour de la valeur médiane de 8,7 cm/mois. Il faut préciser ici que cette dernière année 2021 a vu disparaitre 22% de Niangons dans cette placette qui peut aussi subir des attaques de fourmis manioc.

A l'inverse, les plants survivants de la placette Niang 5, en bas de versant et avec semis de *S. guianensis*, qui montraient des taux de croissance significativement inférieurs au cours des 2 premières années, ont exprimé un taux de croissance en hauteur de 8 cm/mois. Dans cette placette Niang 5, la plupart des arbres qui ont disparu ont d'une part subi l'effet de sols très contraignants, et d'autre part de la présence de *S. guianensis*.

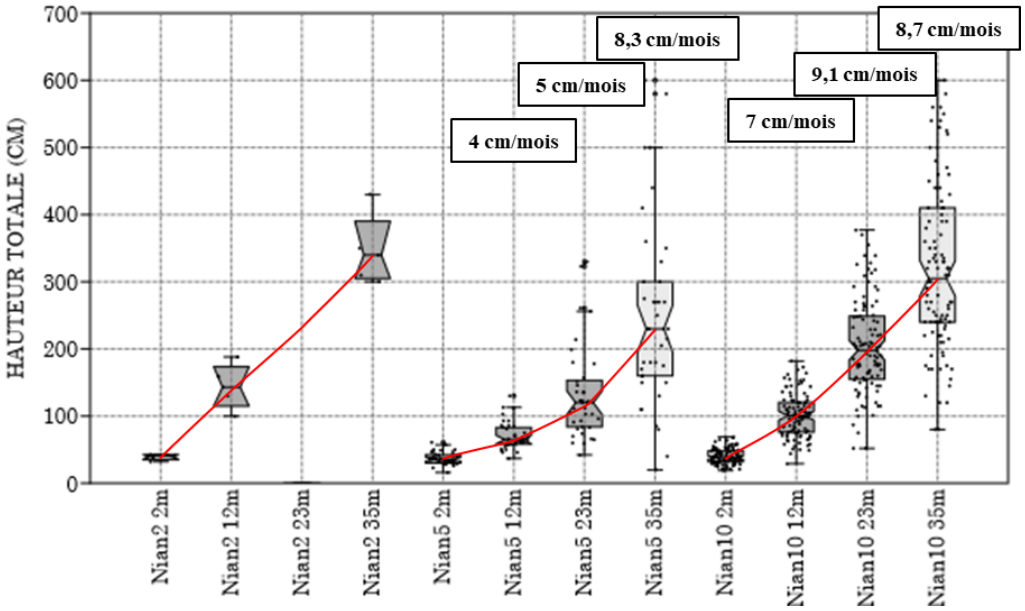


Fig. 70. Hauteurs totales des Niangons sur les 3 placettes plantées (Nian2, Nian5 et Nian10) à différentes dates d'inventaire (à 2, 512, 23 mois et 35 mois). Les taux de croissance mensuels (cm / mois) sont indiqués pour chaque placette et pour chaque période de croissance achevée par un nouvel inventaire.

Pour les Ingas, Avec d'excellents taux de survie compris entre 0,88 et 1, il n'est pas possible de départager les placettes plantées d'Ingas sur ce critère. En revanche, certaines d'entre elles affichent des taux de croissance plus ou moins bons (Fig. 71). Ce sont les plants des placettes 13 et 16 (bordure est du bloc nord) qui

présentent les meilleurs taux de croissance, surtout en 2ème année, tandis que les plants de la placette 21 (bordure nord-ouest de la parcelle) présentent les taux les plus faibles. Les plants des autres parcelles ont des comportements intermédiaires. Les plants des placettes 18 et 20 se rapprochent de ceux des placettes 13 et 16. Les plants de la placette 14 se rapprochent de ceux de la placette 21.

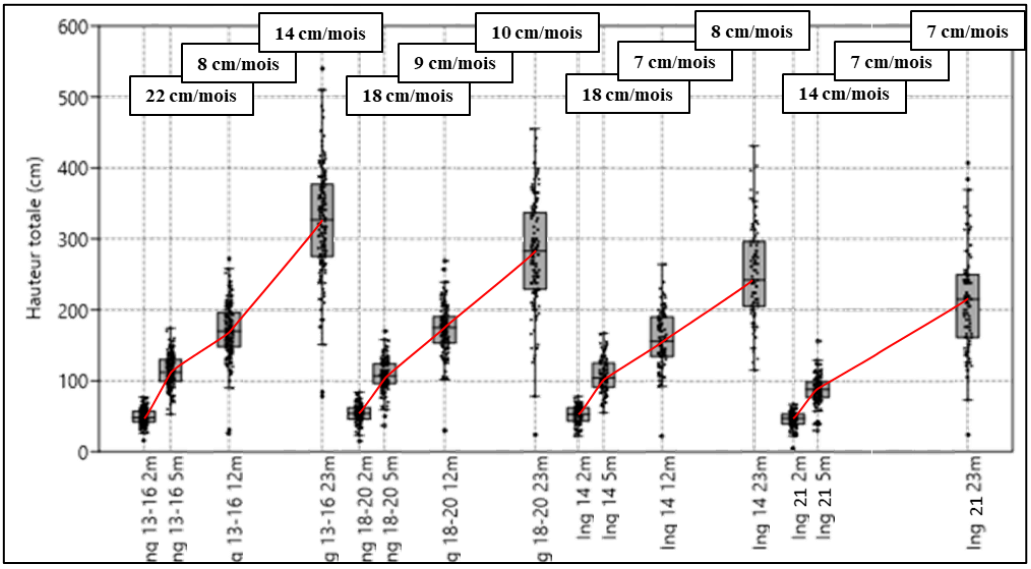


Fig. 71. Hauteurs totales des Ingas sur les 6 placettes plantées (13, 14, 16, 18, 20 et 21) à différentes dates d'inventaire (2, 5, 12 mois et 23 mois ; m : mois). Les taux de croissance mensuels (cm/mois) sont indiqués pour chaque placette et pour chaque période de croissance achevée par un nouvel inventaire.

C/ Conformations des arbres après 23 mois.

Pour les Tecks. Chez le Teck, la prédominance de l'axe principal est manifeste. Quelle que soit la placette, il semble exister une association claire entre le taux de croissance en hauteur et la différenciation de l'axe principal organisateur autour duquel s'organise la ramification latérale assujettie à son développement : après 23 mois de croissance, les arbres présentant une hiérarchie évidente entre axe principal et axes latéraux (Fig. 72 ; classe 1) sont significativement plus grands que les arbres moins bien conformés (Fig. 72 ; classe 2).

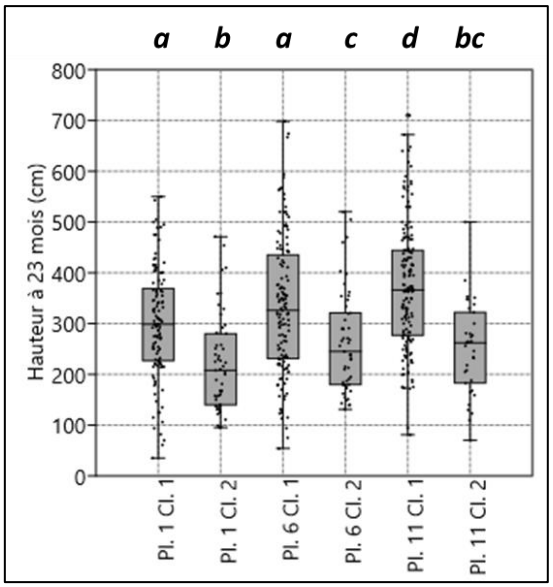


Fig. 72. Box plots de la hauteur (cm) des Tecks de différentes placettes (1, 6 et 11) et appartenant à différentes classes de conformation différentes. La classe 1 (Cl. 1) représente les arbres ayant une hiérarchie marquée entre axe principal et branches latérales. La classe 2 (cl. 2) regroupe les arbres fourchus ou ayant perdu leur hiérarchie entre axes. Les box plots ayant une lettre commune n'ont pas de médianes significativement différentes au seuils de 5% (Kruskal-wallis test).

D'une manière générale, la proportion de tecks bien conformés (Cl. 1) est importante (≥70%), C'est la placette 1 qui a la proportion la plus basse (69%) tandis que les placette 6 et 11 ont des proportions plus importantes (respectivement 73% et 89%).

Pour les bagasses, les jeunes arbres se développent selon le modèle architectural de Rauh (Fig. 73). C'est-à-dire que l'axe principal à croissance rythmique porte des rameaux redressés dont l'agencement foliaire ne diffère pas de celui de l'axe principal. En revanche, l'axe principal garde un taux de croissance bien supérieur à celui des axes latéraux, conférant à l'ensemble une hiérarchie marquée. Toutefois, il arrive que, pour diverses raisons (accident, traumatisme, ralentissement), un ou plusieurs axes latéraux acquièrent un taux et une direction de croissance similaires à ceux de l'axe principal. Le résultat est la présence de 2 ou plusieurs axes dominants qui confèrent à l'ensemble un aspect fourchu, ou bien l'absence d'une hiérarchie claire entre les axes principaux et latéraux (Fig. 73). Lorsque cette situation perdure dans le temps, la formation d'un tronc court comme la formation de 2 troncs « jumeaux » sont des situations souvent observées en plantation forestière, bien moins fréquemment en forêt naturelle.

Fig. 73. Modèle architectural de Rauh (à droite) et jeunes plants de bagasses plantés. Le sujet du milieu présente une hiérarchie marquée entre axe principal et axes latéraux tandis que le sujet de droite présente plusieurs axes dominants sans hiérarchie établie entre eux.

Chez la bagasse, quelle que soit l'origine géographique, il semble exister une association claire entre le taux de croissance en hauteur et la différenciation d'un axe principal organisateur autour duquel s'organise la ramification latérale assujettie à son développement : après 23 mois de croissance, les arbres présentant une hiérarchie évidente entre axe principal et axes latéraux (Fig. 74, classe 1) sont significativement plus grands que les arbres moins bien conformés (classe 2).

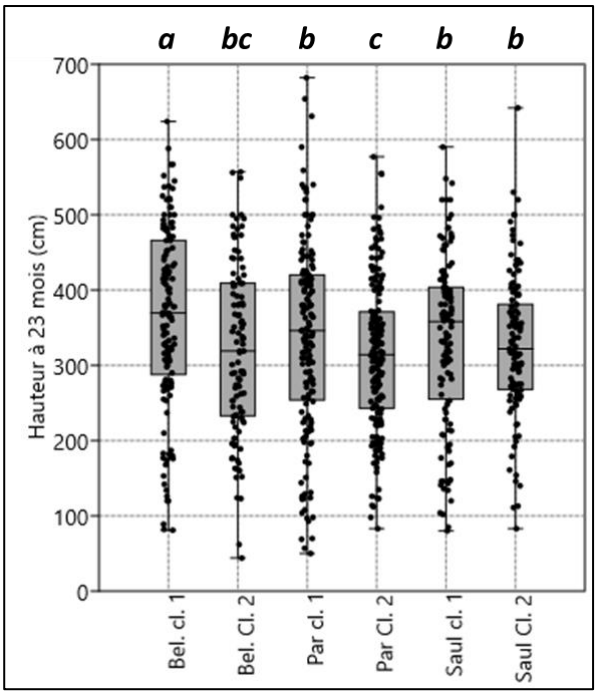


Fig. 74. Box plots de la hauteur (cm) des bagasses de différentes origines (Bélizon, Bel ; Paracou, Par ; Saul) et appartenant à différentes classes de conformation différentes. La classe 1(Cl. 1) représente les arbres ayant une hiérarchie marquée entre axe principal et branches latérales. La classe 2 (cl. 2) regroupe les arbres fourchus ou ayant perdu leur hiérarchie entre axes. Les box plots ayant une lettre commune n'ont pas de médianes significativement différentes au seuils de 5% (Kruskal-wallis test).

La différence de taille n'est pas importante, entre 40 et 50cm. Mais, elle pose aussi la question du lien entre la hauteur et l'absence de hiérarchie : le développement simultané de plusieurs axes principaux au point de ne plus observer de hiérarchie atténuerait-il la croissance en hauteur ? Ce phénomène s'accompagne généralement d'un épaississement plus fort de l'axe principal. En effet, malgré une hauteur significativement différente, les 2 groupes d'arbres, toutes origines confondues, n'ont pas de diamètres significativement différents (Mann-Whitney test for equal medians). Nous pouvons effectivement penser que le phénomène de développement plus fort des latéraux entraine un partage des nutriments plus forts qui ne privilégie plus un seul axe mais plusieurs, et donc une plus faible croissance en hauteur. C'est une relation de cause à effet possible.

D'une manière générale, la proportion d'arbres bien conformés oscille autour de 47% ± 0,11%. Toutefois, certaines placettes présentent une proportion d'arbres bien conformés significativement plus importante ou significativement moins importante que d'autres : les proportions les plus hautes sont sur les placettes avec les arbres les plus hauts, et inversement pour les placettes avec les arbres les moins hauts. Toutefois la relation positive entre hauteur moyenne sur la placette et proportion d'arbres bien conformés reste ténue.

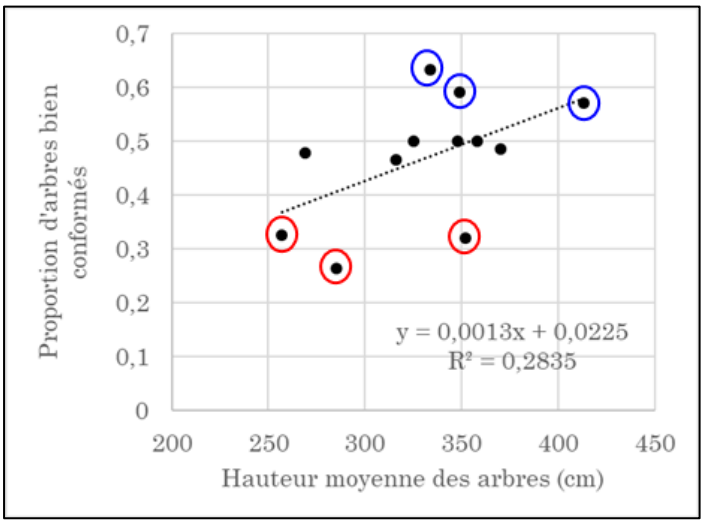


Fig. 75. Relation entre hauteur moyenne (cm) des arbres et proportion d'arbres bien conformés sur les différentes placettes. Chaque point représente une placette. Les ronds rouges ou bleus indiquent les placettes où les arbres bien conformés sont respectivement et significativement sous-représentés ou surreprésentés.

D/ Synthèse.

A la différence du site de Regina, tout s'est déroulé de manière nominale sur le site de Paracou depuis la préparation de la parcelle jusqu'à la plantation des arbres : (1) la préparation a été réalisée en saison sèche et achevée avant novembre 2018, et (2) la plantation a eu lieu en décembre 2018 avec averses intermittentes. Les résultats de cette essai sont le résultat des conditions environnementales et pédoclimatiques.

Le site de Paracou est se démarque des 2 autres par plusieurs aspects :

- C'est une « seconde rotation » (1ère rotation = plantation d'Acacias),
- Sur des acrisols (sablo-argileux),
- Les fourmis manioc sont nombreuses.
- Le recru adventif est très puissant.

La mortalité initiale survenue lors de la première année a été due à 2 éléments :

- Une hydromorphie temporaire qui a rapidement mis « out » la majorité des plants dans la zone concernée, quelle que soit l'espèce.
- Les fourmis manioc ont, dès la plantation, attaqué les plants de certaines espèces, Tecks, Cordias, et notamment les Niangons, espèce la plus sensible à leurs attaques.

Par la suite, le développement optimal du couvert herbacé de *S. guianensis* a compromis le devenir de Niangons et de Cordias rapidement recouvert et couché par le couvert.

Enfin, comme dans de nombreux test, la difficulté à réaliser de manière régulière l'opération de maitrise d'un recru adventif puissant, a compromis le développement de beaucoup d'arbres. En effet, le passage d'un « entretien de type manuel » (mobilisant du personnel à pied ; long, mais souple et orienté ; facilement mobilisable 2 fois par an) à un entretien mécanisé (rapide ; très contraint par le calendrier ; souvent exposé aux avaries mécaniques ; contretemps de réalisation graves) aura finalement eu raison du devenir de cet essai irrémédiablement envahi par le recru adventif depuis le dernier entretien mécanisé réalisé dans les temps, c'est-à-dire en septembre 2020.

Ainsi, jusqu'à la fin de l'année 2020, les plants se sont développés dans le contexte d'un itinéraire maitrisé intégrant l'existence d'un couvert herbacé semé ou bien d'un couvert adventif parfaitement régulé, et à aucun moment annihilé (sol protégé). Malgré cela, les arbres de la parcelle de Paracou ont significativement moins poussé en hauteur que ceux de la parcelle de Regina. Il est utile ici de souligner que le contexte édaphique de la parcelle de Paracou est très différent de celui de Regina avec des proportions de sables grossiers sur tout le profil (>48%) bien plus importantes qu'à Regina (<32% en crête). Aves conditions moins humides, la plus faible dynamique de croissance en hauteur à Paracou peut très bien avoir pour origine un bilan hydrique moins favorable qu'à Regina. Par

ailleurs, à Paracou, les sols sont plus denses (1,5) et les quantités d'azote sont bien plus faibles qu'à Regina. Tout ceci concourt à ce que les arbres de Paracou poussent moins que ceux de Regina.

Bagasses. Durant les 2 première années de maitrise réelle du recru, les Bagasses ont exprimé un développement régulier, mais bien moins dynamique que celui des bagasses de Regina : 1,7 m/an *versus* 2,5 m/an. Au terme de la 3ème année, envahies par le recru adventif, le taux de croissance en hauteur des bagasses de Paracou a chuté à 0,7 m/an tandis qu'il était de 2,5 m/an à Regina au même âge. De manière intrinsèque, la dynamique de croissance des Bagasses sur les Acrisols de Paracou aura été bien plus faible en comparaison de celle observée sur les Ferralsols de Regina. Cette moindre croissance à Paracou se traduit aussi par une plus grande variabilité de la croissance qui souligne soit une sensibilité plus importante au conditions du milieu, soit une plus grande variabilité des conditions du milieu. Cette moindre croissance en hauteur s'accompagne aussi d'une moindre différenciation d'un axe principal.

Cordias. Pour rappel, les Cordias plantés à Paracou sont originaires de Saul (Guyane) et du Costa Rica. Sans que ces 2 origines ne se différencient vraiment, les taux de croissance en hauteurs sont plutôt modestes sur la parcelle de Paracou, significativement en deçà des valeurs observées à Regina, bien que certains d'entre eux expriment des croissances remarquables. Leur croissance en hauteur semble aussi marquer le pas en 2021. Enfin, ils montrent la même sensibilité aux conditions pédologiques assez variables sur la parcelle en montrant des développements divers, parfois assez bas sur certaines zones plus contraignantes.

Tecks. A Paracou aussi, après avoir montré des taux de croissance importants la première année après plantation, les taux de croissance décroissent tandis que cette espèce montre une très grande variabilité de développement des arbres sur la parcelles, si ce n'est pas la plus grande avec des coefficients de variations importants. C'est aussi l'espèce qui montre le plus d'individus déclinant, en précisant que nombreux subissent régulièrement les attaques des fourmis manioc. A Paracou aussi, le fait que l'ensemble des tecks finisse par décliner suscite une interrogation sur l'adaptabilité du Teck aux conditions pédoclimatiques de la parcelle de Paracou. Caractères physico-chimiques des sols du site ou bien excès évidents de pluie ces 2 dernières années (2021, 2022) ne sont pas exclus dans la formulation de cette hypothèse.

Niangons. A Paracou, les Niangons ont eu à souffrir des attaques de fourmis manioc et de la concurrence imposée par le couvert herbacé de *S. guianensis*. En effet, à Paracou, les taux de croissance de cette espèce sont de l'ordre de 1 m/an, voire moins. Cette espèce poussant bien plus lentement que les autres espèces au cours des 2 premières années, elle ne se dégage pas rapidement ni du couvert herbacé semé, ni du recru. Par ailleurs, les fourmis manioc peuvent les défeuiller intégralement et gravement impacter leur croissance comme leur survie. Comme

à Regina, quelques individus montrent un développement remarquable. Ces individus seront-ils résilients aux attaques des fourmis manioc ?

Pois sucré. *Inga edulis* est l'espèce qui s'est la mieux comportée sur le site de Paracou ! C'est aussi celle qui montre les plus faibles coefficients de variation. Il est utile de rappeler aussi que cette espèce a aussi bénéficié d'une fertilisation de fond à la plantation. Dans plusieurs parcelles, les couronnes se touchent et le couvert végétal est complet, contraignant maintenant le développement du recru adventif.

3 - Le site de Cacao.

Organisation générale de la parcelle. La figure 76 présente la situation de la parcelle constituée de 18 placettes.

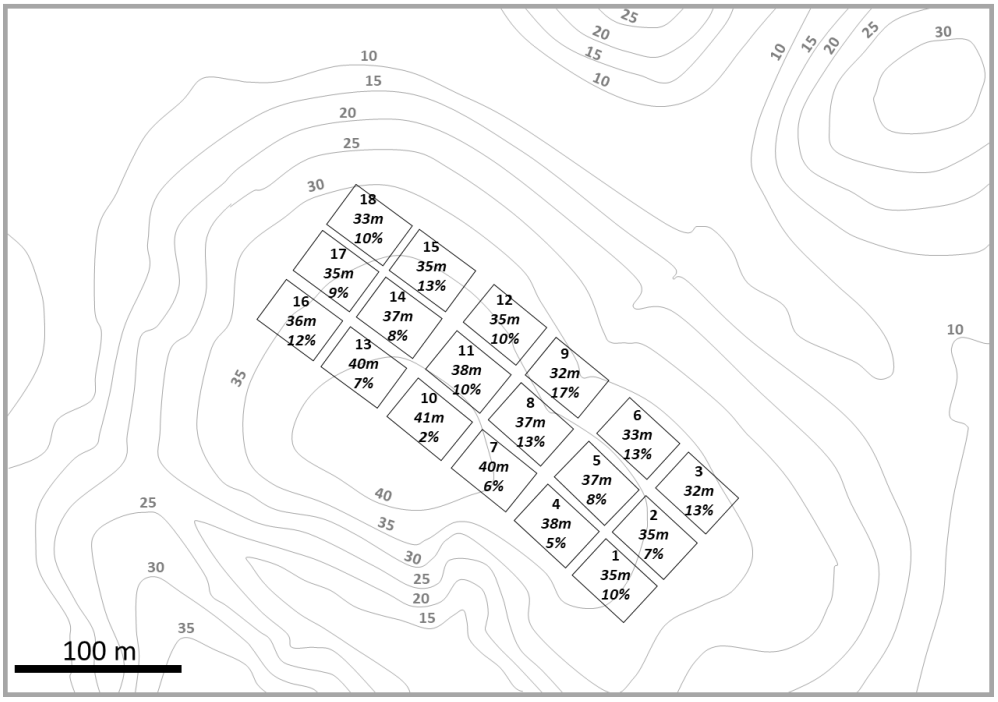


Fig. 76. Situation de la parcelle de Cacao. Elle est sise sur le sommet d'une colline. Chaque cadre représente une placette avec son numéro, son altitude moyenne et sa pente moyenne.

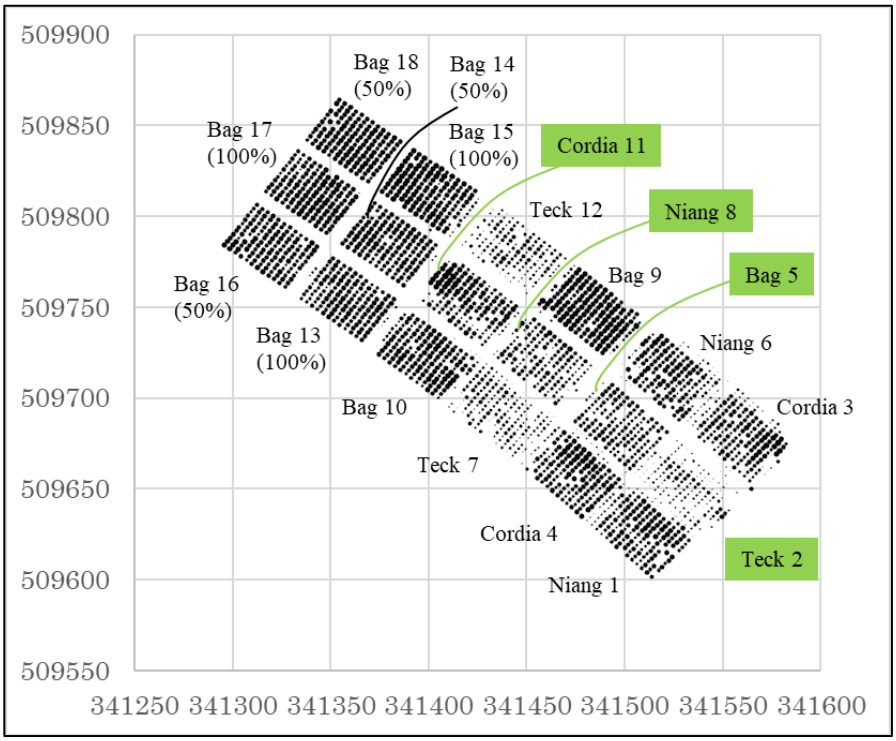


Fig. 77. Organisation générale de la parcelle de Cacao à 39 mois. Chaque point noir représente un arbre planté encore vivant. La taille du point est proportionnelle à la hauteur totale de l'arbre. Chaque intitulé indique le nom vernaculaire de l'espèce ainsi que le numéro de la placette. Bag : Bagasse ; Niang : Niangon ; Ing : Inga. Les intitulés en fond vert indiquent la présence du couvert herbacé semé lors de la préparation de la parcelle.

La figure 77 présente la parcelle de Cacao à 39 mois (dernier inventaire : aout 2022) après plantation en mai 2019. Cette parcelle est constituée d'un bloc de 12 placettes comparant les 4 espèces forestières plantées, et d'un bloc de 6 placettes plantées soit de bagasses (Bag 100%), soit d'un mélange de Bagasses et d'Ingas (Bag 50% = Ing 50%). Cette figure 77, où chaque point représente un arbre encore

vivant, rend compte de la survie et de la hauteur totale des arbres dans les 18 placettes. *Nota bene*. Nous parlerons dans ce qui suit, d'une « placette 19 » dans une parcelle qui n'en compte que 18. Cette placette 19 n'est pas dans un endroit précis de la parcelle puisqu'elle regroupe des tecks surnuméraires plantés dans les espaces laissé initialement libres entre les placettes. C'est un ensemble dispersé.

A/ Taux de survie, taux de mortalité et état sanitaire.

Après 39 mois de développement, le pourcentage de survie reste très élevé sur la parcelle (94,2 %), et il est peu variable d'une parcelle à l'autre (Fig. 78). Le plus faible taux (37%) est observé chez des Tecks rajoutés au dispositif (Teck 19) et n'ayant pas reçu de fertilisant de fond à la plantation.

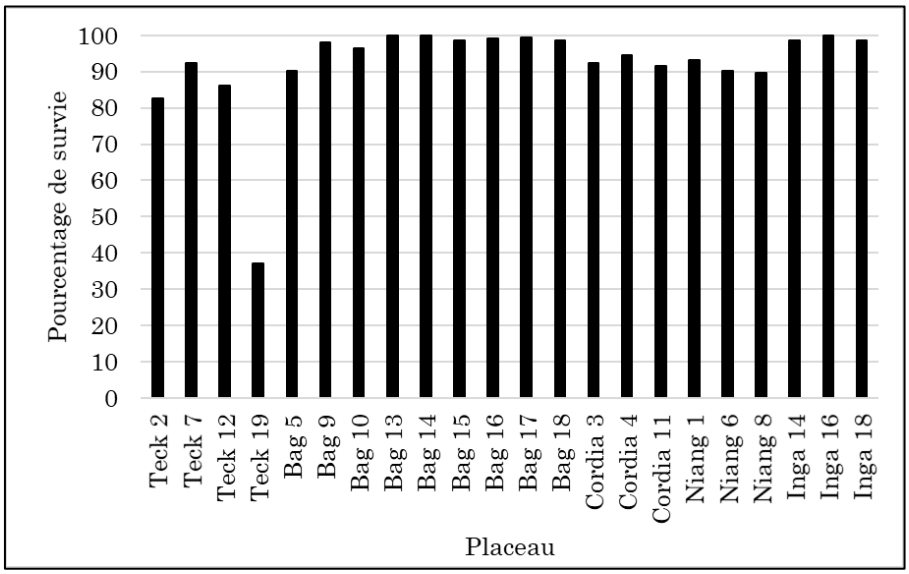


Fig. 78. Pourcentage de survie des arbres plantés à 39 mois pour les 5 espèces dans les 18 placettes de la parcelle de Cacao. Chaque intitulé indique le nom vernaculaire de l'espèce ainsi que le numéro de la placette. Bag : Bagasse ; Niang : Niangon.

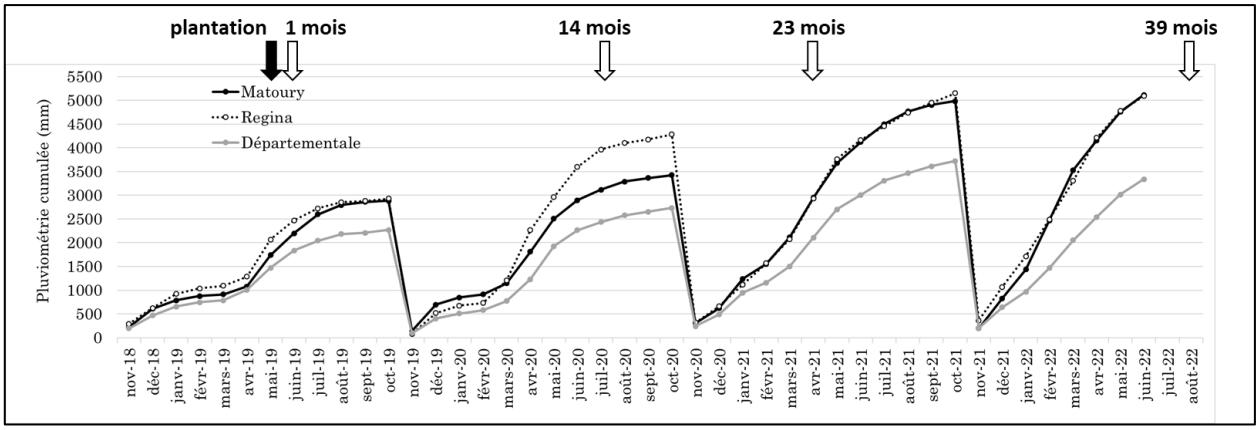


Fig. 79. Evolution de la pluviométrie cumulée sur 12 mois [novembre-octobre] pour les années 2019 à 2022 à Matoury, Regina et sur l'ensemble du département durant la période de suivi de la parcelle de Cacao. Ne disposant pas encore de la pluviométrie de Cacao, nous avons choisi 2 autres stations (Regina et Matoury) qui donne la tendance dans cette partie de la Guyane. D'une manière générale, la pluviométrie en 2021 et 2022 est bien supérieure à celle de 2019 et 2020. Les flèches blanches indiquent les différentes dates d'inventaire.

L'avant-dernier inventaire (23 mois après plantation) a permis de dresser le bilan de l'état des arbres après 2 ans de croissance dans des conditions d'humidité proche de la « normale ». En effet, en avril 2021, les arbres n'ont pas encore expérimenté les niveaux exceptionnels de pluviométrie qui se produiront par la suite (Fig. 79). La figure 80 présente la répartition des arbres sains (bleu), en souffrance (orange) ou dépérissant (rouges) dans la parcelle de Cacao à 23 mois.

Sur la parcelle (Fig. 80), les arbres sains (points bleus) sont largement majoritaires (73 %). En revanche, les arbres dépérissant (points rouges) sont en minorité (1,9 %) et ne sont observés qu'en périphérie des placettes : ce sont surtout des tecks surnuméraires de la « placette 19 » non fertilisés en profondeur (84 % des arbres dépérissant). Les arbres en souffrance (points jaunes), observés à hauteur de 19 %, sont surtout observés dans les placettes de tecks (76 % des arbres en souffrance ; Teck 7 et Teck 12, ainsi que dans la « placette 19 »), tandis qu'ils sont bien moins fréquents chez les autres espèces. Dans une même zone de « souffrance », celle-ci est visible chez tous les tecks sans distinction clonale, suggérant des contraintes imposées par le sol. Cette figure souligne plusieurs autres éléments : le teck a une très grande capacité à se maintenir dans des conditions contraignantes sans mourir, mais il exprime des signes évidents de stress.

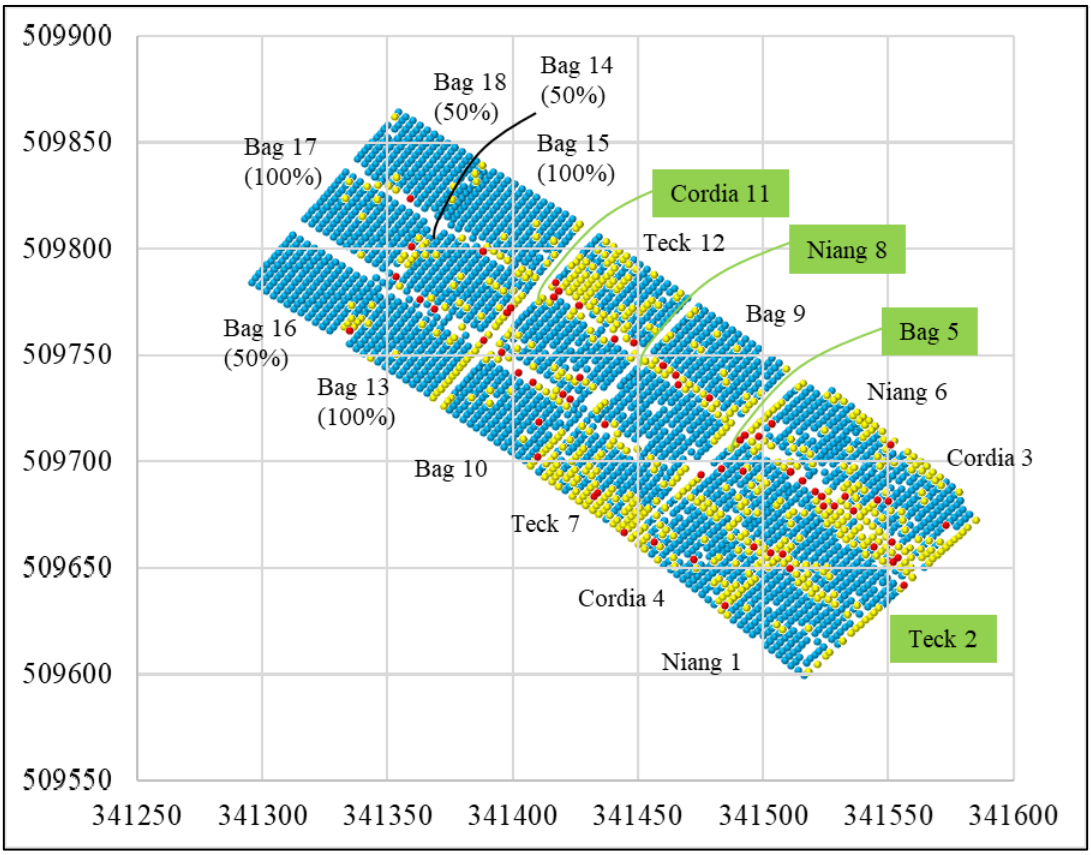


Fig. 80. Répartition des arbres sains (bleu), en souffrance (orange) ou dépérissant (rouge) dans la parcelle de Cacao à 23 mois. Chaque point représente un arbre vivant. Les vides sont laissés par des arbres morts. Bag : Bagasse ; Niang : Niangon ; Ing : Inga. Les intitulés en fond vert indiquent la présence du couvert herbacé semé lors de la préparation de la parcelle.

A 39 mois (aout 2022), la situation est bien différente (Fig. 81). Les arbres dépérissant sont bien plus nombreux (32 %) et sont maintenant observés chez 3 des 5 espèces plantées : Tecks (91 %), Cordias (22 %) et Bagasses (17 %) par ordre décroissant de gravité. En revanche, très peu d'arbres dépérissant sont observés chez les Ingas (0 %) et les Niangons (1 %).

Plusieurs remarques peuvent être formulées : (1) les bagasses des placettes 13 à 18 situées dans la partie ouest ne sont pas affectées à l'inverse des bagasses en mauvais état des placettes plus à l'est ; (2) dans cette même partie est de la parcelle affectée par le dépérissement, les placettes de Niangons constituent des ilots d'arbres en bonne santé. Il est utile ici de préciser qu'un entretien a été réalisé sur la parcelle. Sur certaines placettes, le sol était si gorgé d'eau, que l'entretien n'a pu être réalisé, même après 2 semaines sans pluies.

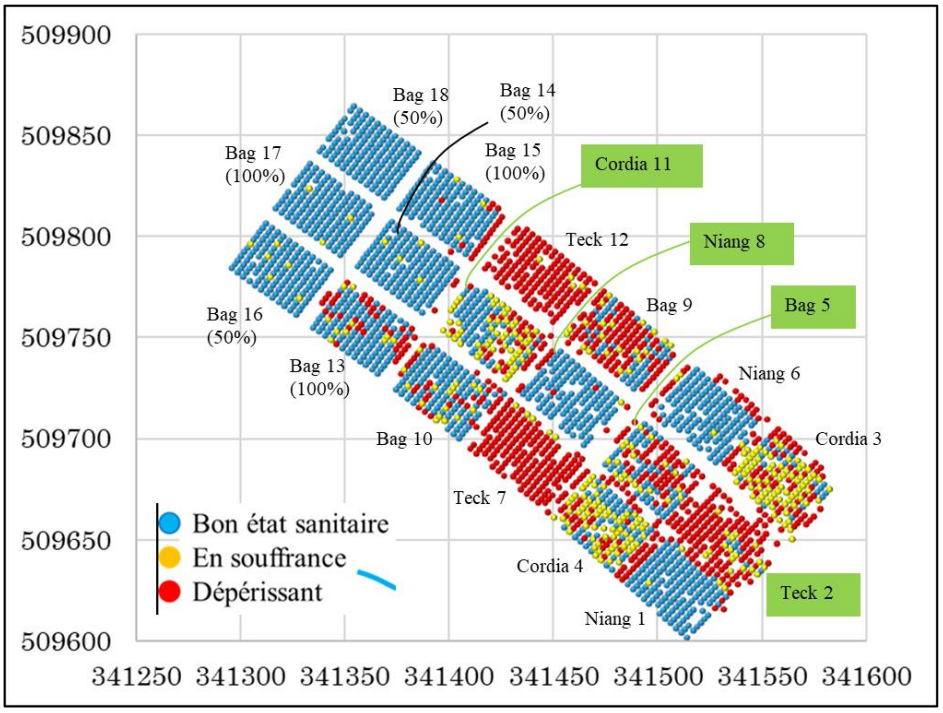


Fig. 81. Répartition des arbres sains (bleu), en souffrance (orange) ou dépérissant (rouge) dans la parcelle de Cacao à 39 mois.

Le figures 82 à 90 (© Vincent Bézard, ONF) présentent l'aspect structurel et sanitaire des arbres lors du dernier inventaire.

Fig. 82. Placeau Niang 1. En aout 2022, les Niangons de ce placeau conservent toujours de grandes séries foliaires. Par ailleurs, les feuilles sont bien vertes, signe d'un bon fonctionnement foliaire, tandis qu'elles jaunissent et tombent lorsque les arbres souffrent de conditions hydromorphiques même passagères. Ces Niangons ne semblent pas souffrir des conditions stressantes qui sévissent sur la parcelle. © V. Bezard.

Fig. 83. Placeau Niang 6. Ce placeau est voisin des placeaux Cordia 3 et Bag 9 qui hébergent des arbres en mauvais état sanitaire. Les arbres de ce placeau Niang 6 expérimentent les mêmes conditions pédoclimatiques qui font souffrir les Cordias et les Bagasses des placeaux 3 et 9. Pourtant, en aout 2022, les Niangons de ce placeau conservent toujours de grandes séries foliaires. Toutefois, certains présentent des feuilles plus jaunes suggérant que certains Niangons ne sont pas complètement insensibles à l'excès d'eau de ces 2 dernières années sur la parcelle. © V. Bezard.

Fig. 84. Placeau Cordia 3. Ce placeau est voisin de Niang 6. Les arbres en piteux état sont tellement défeuillés que l'on voit les Niangons en arrière-plan.

Fig. 85. Placeau Cordia 4. Ce placeau montrent des arbres en bon état sanitaire (photographie du haut) et des arbres en souffrance (photographie du bas). © V. Bezard.

Fig. 86. Placeau Bag 9. Ce placeau est voisin de Niang 6. Beaucoup de Bagasses de ce placeau sont totalement défeuillées tandis que d'autres conservent encore des feuilles.

Fig. 87. Placeau Bag 17. La plupart des Bagasses de ce placeau sont feuillées. Toutefois, les feuilles sont jaunissantes, signe de conditions stressantes qui sévissent sur la parcelle en aout 2022. © V. Bezard.

Fig. 88. Placeau Bag 14. La plupart des Bagasses de ce placeau sont feuillées, tout comme les Ingas qui montrent un état sanitaire excellent. © V. Bezard.

Fig. 89. Placeau Teck 7. La plupart des Tecks de ce placeau sont défeuillés et dépérissant. © V. Bezard.

Fig. 90. Placeau Teck 12. La plupart des Tecks de ce placeau sont défeuillés et dépérissant. © V. Bezard.

Nous avons aussi relevé pour la première fois en plantation et sur les Niangons (placette Niang 1), des attaques d'insectes (Fig. 91) généralement observées en forêt naturelle, sur certaines essences forestières comme l'Angélique de Guyane (*Dycorinia guianensis*) ou bien le Grignon franc (*Sextonia rubra*), mais aussi sur d'autres espèces d'arbres.

Fig. 91. Aspects des attaques relevées sur le Niangon de la placette Niang 1 de la parcelle de Cacao (© V. Bézard, ONF).

Ces attaques sont vraisemblablement le fait d'un coléoptère appartenant au genre *Oncideres* (Fig. 92, photo 1). Dans une étude de 2001 concernant l'Angélique de Guyane, Caraglio, Nicolini et Petronelli ont observé l'insecte (photo 1), mais aussi les dégâts couramment occasionnés par l'insecte. La femelle, plus imposante que le mâle (photo 1), annelle des axes parfois épais de plus de 5 cm d'épaisseur (photo 2). Avec le vent, l'axe se rompt et arbore cette cicatrice typique (photo 3). Sur la partie d'axe tombée au sol, la femelle fait des entailles (photo 4) et y pond des œufs qui donneront des larves qui parasiteront la structure. Les arbres peuvent être soit décapités (dessin 5), soit émondés (dessin 6).

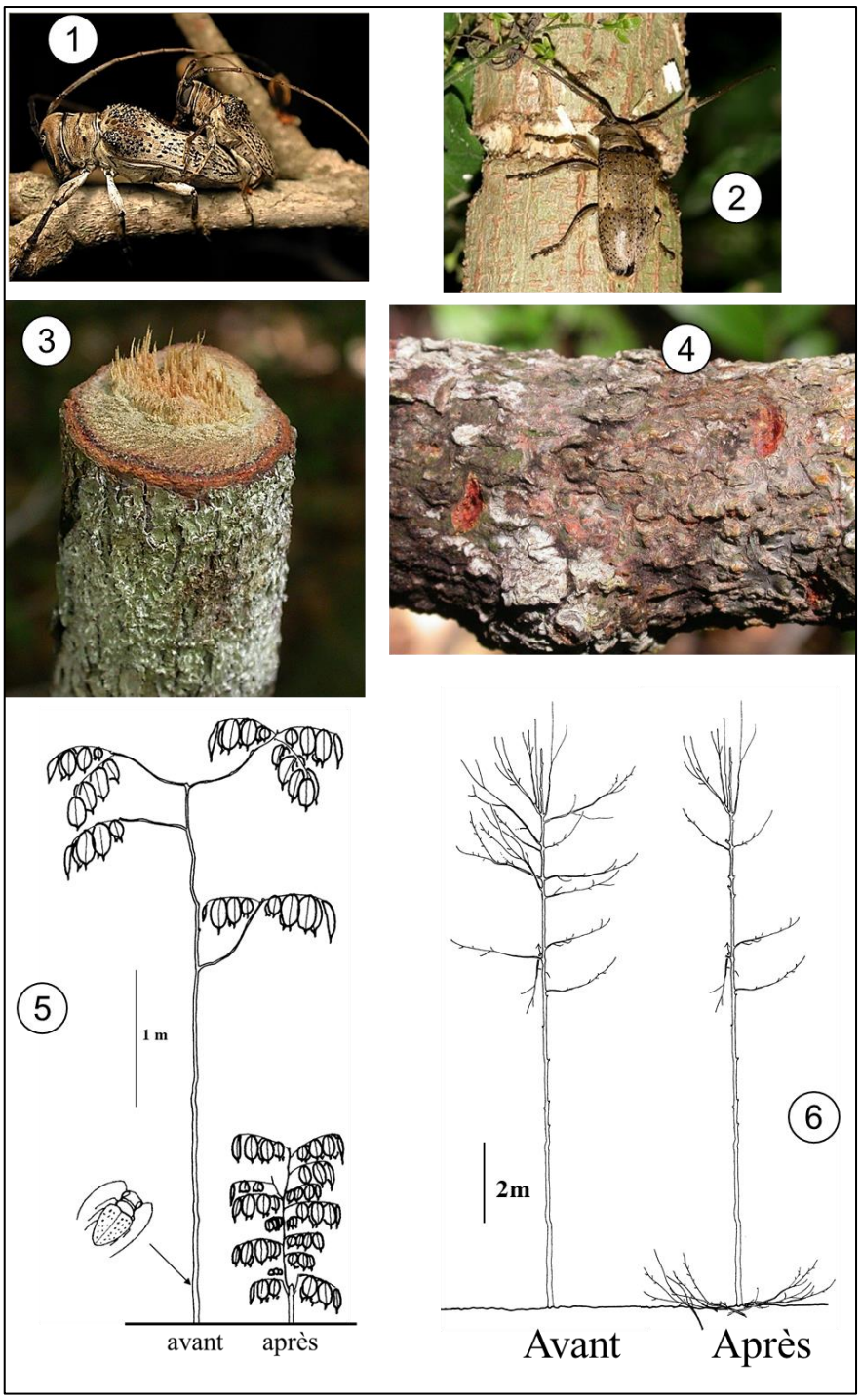


Fig. 92. Aspects des attaques d'Oncideres chevrolatii relevées sur l'Angélique de Guyane (Dicorynia guianensis) d'après Caraglio et al (2001).

Il est utile ici de préciser que les attaques sur Niangons n'ont été observées que sur le placeau Niang 1, placeau le plus proche de la forêt naturelle voisine aussi, sur 9 arbres dont 7 provenaient de l'origine « Egyptienne » et 2 provenaient de l'origine « Paracou » (« appétence » différente entre les 2 origines ?). Sur les 9 arbres attaqués et ainsi fragilisés, un seul arbre s'est rompu passant de 3 m à 2 m.

Dans ce cas, la rupture était associée à la formation de rejets destinés à remplacer la partie perdue. Toutefois, des rejets sont aussi formés sous la blessure sans qu'il y ait rupture chez les autres arbres.

Certains arbres montrent plusieurs blessures successives comme l'atteste cette partie tombée au sol après rupture (photo à droite © V. Bézard).

Lorsque l'arbre n'est pas rompu, parfois le diamètre de l'axe au-dessus de la blessure peut être plus important qu'en dessous de la blessure (photo à gauche ; © V. Bézard).

La photographie de gauche montre aussi la capacité du Niangon à refermer les blessures causées par l'insecte. Toutefois, nous ne savons pas si l'axe affectée conservera une certaine fragilité à ce niveau : l'axe pourrait-il se rompre dans quelques années ?

<u>B/ Hauteurs et taux de croissance</u>.

Le dernier inventaire à 39 mois révèle aussi une forte hétérogénéité de hauteur totale moyenne (Fig. 93) à l'échelle de la parcelle ou de la placette. La plus forte valeur de médiane sur le site de Cacao est de 17,5 cm/mois (contre 20 cm/mois à 50 mois sur le site de Regina et 14 cm/mois à 35 mois sur le site de Paracou). Au niveau spécifique, ce sont les bagasses et les Ingas qui présentent les hauteurs totales médianes les plus importantes, respectivement comprises entre 500 et 700 cm, et entre 500 et 650 cm. Puis viennent les Cordias (450-500 cm) et les Niangons (310-500 cm). Les Tecks sont les plus petits arbres du dispositif avec une hauteur médiane comprise entre 100 et 200 cm. Le lecteur notera aussi certaines placettes où la hauteur totale moyenne est nettement plus faibles. Ce sont les placettes Teck 2, Bag 5, Cordia 11 et Niang 8 qui ont été plantées avec du couvert herbacé semé de *Stylosanthes guianensis*. A noter aussi les tecks de la placette Teck 19 plantés sans apport de fertilisant en profondeur.

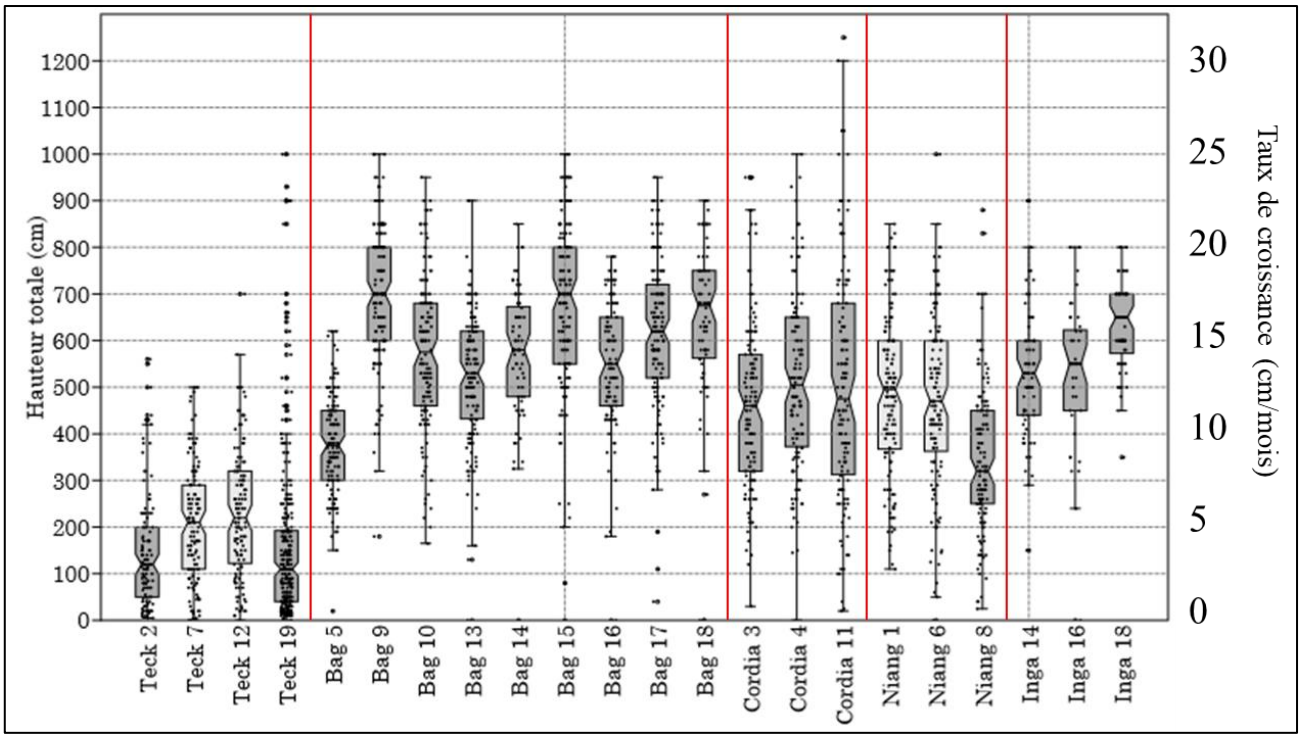


Fig. 93. Box plots de la hauteur totale (cm) et du taux de croissance (cm/mois) par placette des 5 espèces après 39 mois de développement après plantation sur la parcelle de Cacao.

En termes de variabilité et d'homogénéité de la croissance dans les placettes, ce sont les Bagasses et les Ingas qui ont les plus faibles coefficients de variation moyens (Fig. 94 ; respectivement 26%±2 et 23%±8), signe d'un développement homogène. Puis viennent les Cordias (43%±7) et les Niangons (40%±5) qui ont des valeurs très similaires. Ce sont les Tecks (79%±24) qui ont des valeurs les plus élevées, même en excluant la valeur la plus haute correspondant à la placette 19 de tecks surnuméraires non fertilisés à la plantation. C'est l'espèce qui a le développement le plus hétérogène sur la parcelle.

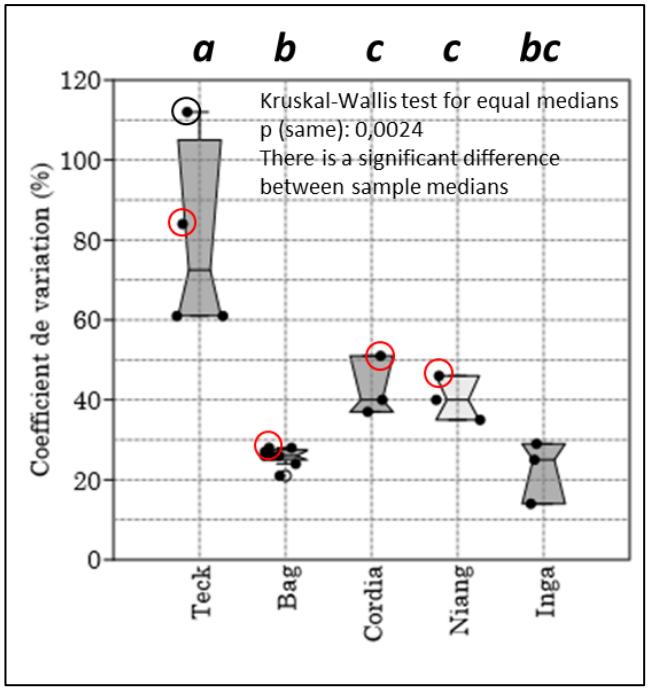


Fig. 94. Box plots du coefficient de variation (CV) pour la hauteur totale des arbres 39 mois après la plantation. Bag : Bagasse ; Niang : Niangon. Les box plots avec la même lettre n'ont pas leurs médianes significativement différentes. Les ronds rouges indiquent les valeurs pour les placettes avec couverture herbacée de S. guianensis. Le rond noir indique le coefficient de variation pour la placette Teck 19 sans fertilisation de fond à la plantation.

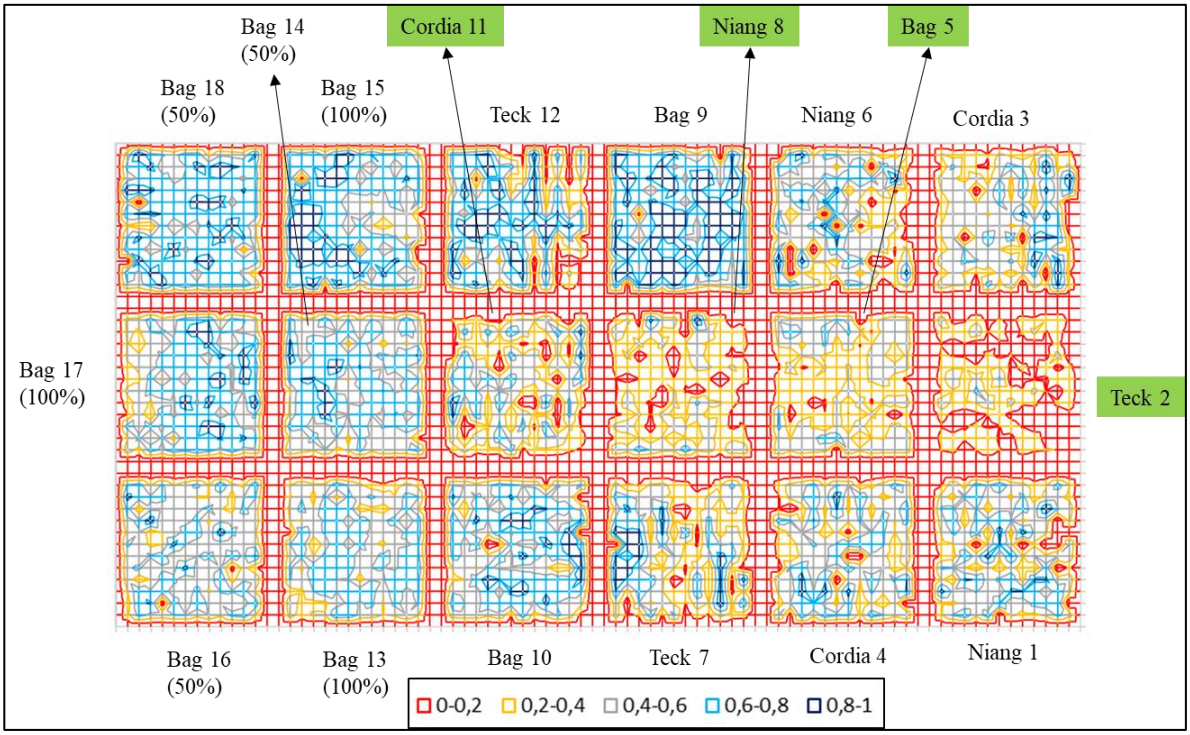


Fig. 95. Hauteur relative des plants sur la parcelle de Cacao à 23 mois. Cette hauteur relative est calculée à partir du rapport entre la hauteur totale ***h*** *de chaque plant et la hauteur* $\boldsymbol{H_{sp}}$ *du plant le plus haut faisant partie de la même espèce et ayant la même origine (clone, origine géographique). La valeur de ce rapport est comprise entre 0 et 1 et figurée par 5 classes différentes (échelle de couleur). Chaque intitulé indique le nom vernaculaire de l'espèce ainsi que le numéro de la placette. Bag : Bagasse ; Niang : Niangon. Les intitulés en vert indiquent la présence du couvert herbacé semé.*

La figure 95 spatialise la hauteur relative des arbres sur la parcelle de Cacao. Cette normalisation permet de mesurer le succès de chaque individu quelle que soit leur appartenance spécifique et de rendre compte des zones dans lesquelles les plants se sont le mieux développés. Bien que cette parcelle ne montre pas d'évènement notable comme une mortalité excessive, il existe une variabilité de la croissance. Ce sont les placettes plantées avec couvert herbacé de *S. guianensis* qui montrent les plus faibles valeurs relatives de hauteur. Les tecks (placette Teck 12) sont particulièrement affectés, puis viennent les Niangons (Niang 8). La placette 9 qui se trouve dans une petite dépression en bas de pente montre les plus hautes valeurs relatives de hauteurs vraisemblablement en raison d'une humidité du sol plus importante. Hors influence du couvert herbacé, ce sont les placette opposées Cordia 3 et Bag 16 et Bag 13 qui montrent les plus faibles hauteurs relatives.

<u>Pour les tecks</u>, le suivi de la croissance en hauteur permet de discerner des différences significatives de comportements entre placettes (Fig. 96). C'est la placette Teck 2 accompagnée d'un couvert herbacé de *S. guianensis*, qui a eu les plus faibles taux d'accroissement. Cette faible croissance peut être même assimilée à un blocage temporaire de la croissance en hauteur. Mais cela n'est plus vrai pour la dernière période de croissance mesurée. Néanmoins, le retard est considérable

puisque la hauteur moyenne des arbres est d'environ 150 cm contre environ 400 cm pour la placette Teck 12. Cette dernière placette 12, située en bas de pente, montre des accroissements significativement plus importants que ceux de la placette Teck 7 située en haut de pente. Néanmoins, la hauteur régresse en raison d'un dépérissement généralisé des arbres entre 2021 et 2022 dans toutes les placettes, signe que le Teck souffre partout sur la parcelle (1% d'individus sains).

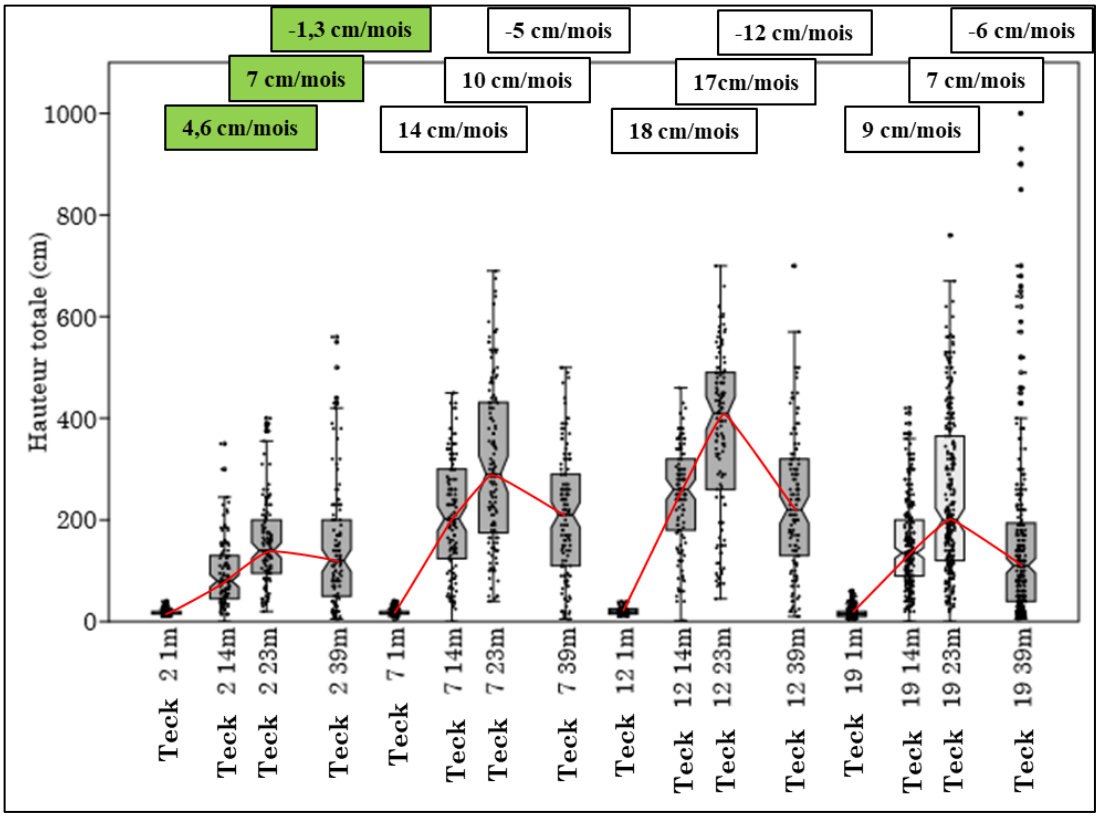


Fig. 96. Box plots de la hauteur totale des tecks sur les placettes plantées (Teck 2, Teck 7, Teck 12 et Teck 19) à différentes dates d'inventaire (à 1, 14, 23 et 39 mois ; respectivement 1m, 14m, 23m et 39m). Les placeaux avec couvert herbacé de Stylosanthes guianensis sont indiqués par des encadrés à fond vert. La placette Teck 19 regroupe des individus surnuméraires qui n'ont pas reçu de fertilisant de fond.

La grande majorité des arbres surnuméraires non fertilisés de la placette Teck 19, et dispersés dans toute la parcelle, montrent des taux de croissance très faibles voire même nuls, tandis qu'un quart des individus ont pu exprimer des accroissements conséquents et atteindre des hauteurs comparables aux plus grands individus des placettes 7 et 12. Aucune différence significative notable de hauteur totale des arbres n'a pu être mise en évidence entre les 10 clones plantés.

Il ressort aussi que les taux de croissance en hauteur des clones de Tecks sur la parcelle de Cacao sont significativement inférieurs à ceux observé sur le site de Regina. Ainsi, même en l'absence de *S. guianensis*, les Tecks du site de Cacao avaient en moyenne 2 à 3 m de haut en fin de 1ère année et 4 m en fin de 2ème année (contre 3m, puis 6 ou 8m sur le site de Regina). Pourtant, sans être similaires, les conditions édaphiques des 2 sites sont plutôt très favorables à la croissance des arbres. De la même manière, l'association « Teck - *S. guianensis* » a

considérablement limité la croissance en hauteur des Tecks sur le site de Cacao alors qu'elle a autorisé de très forts taux de croissance des Tecks sur le site de Regina ! La plantation « tardive » (mois de mai d'une année 2019 relativement sèche) serait-elle à l'origine de cette déconvenue ? Pour rappel, le site de Regina a été planté en janvier (2018) avec la perspective de 8 mois plutôt humides avant la grande saison sèche ; contre seulement 4 mois pour les Tecks du site de Cacao. Nous avons aussi démontré l'importance de la profondeur d'enracinement chez le Teck sur le site de Regina : elle est déterminante pour l'alimentation en eau et l'établissement d'une croissance en hauteur soutenue chez des boutures de clones plutôt prompts à développer des systèmes racinaires traçants (Fig. 28, 29 et 112). Il n'est pas illogique de penser que les boutures des clones plantés à Cacao n'aient pas disposé de suffisamment de temps (4 mois) pour développer des systèmes racinaires assez profonds et conséquents avant le retour de la grande saison sèche (septembre-octobre). Par la suite, avec la croissance du recru natif, ils ne sont plus parvenus à reprendre un développement plus dynamique.

Pour les Bagasses, natives de Guyane, les arbres ont d'une manière générale exprimé des dynamiques de croissance en hauteur importantes autour de 20 cm/mois (2,4 m/an). En revanche, au-delà de 23 mois, la dynamique de croissance diminue sur l'ensemble des parcelles de Bagasses autour de 10 cm/mois (1,2 m/an). Cette diminution peut être reliée à la pluviométrie excessive qui a été observée à partir de 2021 et qui s'est prolongée en 2022. **Aucune différence significative n'a pu être mise en évidence entre les 3 provenances plantées**. L'examen des dynamiques de croissance a permis d'isoler 6 groupes de placettes (Fig. 97) et d'établir des comparaisons entre les différentes situations dans la parcelle.

C'est dans la placette Bag 5 avec couvert herbacé que les taux de croissance des premiers mois de développement ont été les plus faibles. Ils le sont aussi au-delà de 23 mois. Ainsi, la présence de *S. guianensis* a très vraisemblablement imposé une contrainte et une compétition pour l'eau notable aux arbres au cours de la première année de développement. Par ailleurs, le retard pris par ses arbres semble les défavoriser durant la période très pluvieuse de 2021-2022 (23-39 mois).

Dans les placettes sans couvre sol herbacé, les arbres ont exprimé des dynamiques plus soutenues. Parmi les placettes, c'est Bag 9 qui a montré les plus forts taux de croissance au cours des 19 premiers mois. C'est aussi la placette qui a la plus basse altitude (32m), située dans une petite dépression de bas de pente. Les arbres auront pu bénéficier de conditions édaphiques plus humides en saison sèche. En revanche, C'est aussi dans cette placette que le taux de croissance médian a eu la plus forte diminution entre 23 mois et 39 mois, période qui a été très arrosée.

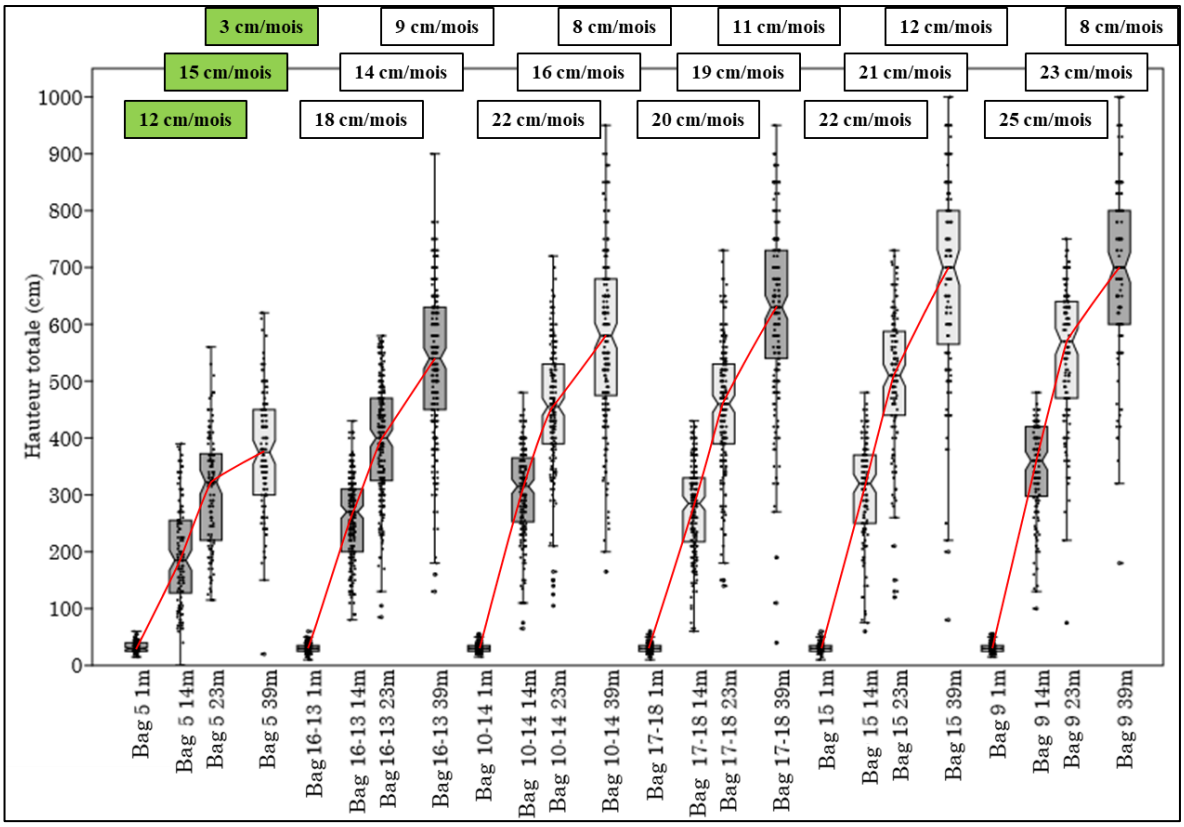


Fig. 97. Box plots de la hauteur totale des Bagasses sur les 9 placettes plantées (Bag 5, 1-13, 10-14, 17-18, 15 et 9) à différentes dates d'inventaire (à 1, 14, 23 et 39 mois ; respectivement 1m, 14m, 24m et 39m). A partir de la comparaison des taux de croissance successifs de ces 12 placeaux, 6 groupes ont été identifiés. Les placeaux avec couvert herbacé de S. guianensis sont indiqués par des encadrés à fond vert.

Les autres groupes montrent des dynamiques de croissance intermédiaires qui peuvent être replacées et structurées par l'altitude : ainsi, les plus forts taux médians d'accroissement en hauteur relevés durant la période « 14-23 mois » sont exprimés dans les placettes de plus basses altitudes (Fig. 98) : l'hypothèse est qu'à basse altitude, les arbres expérimentent vraisemblablement des taux d'humidité supérieurs. Cette tendance est aussi relevée durant la période « 23-39 mois », mais à un niveau bien plus bas, signe que les arbres ont été significativement affectés par la période très pluvieuse. A ce propos, la comparaison entre 2 placettes d'altitudes similaire, la placette 9 (talweg ; altitude 32 m) et la placette 18 (adossée à la pente ; altitude 33m), montre que c'est la placette 9 capitalisant le plus les eaux de ruissellement qui a connu la diminution la plus drastique des taux médians de croissance (Fig. 98).

A noter aussi sur cette figure 98, que les taux de croissance médians des Bagasses des placettes mixtes sont situés dans la partie basse du nuage de points pour la période « 14-23 mois ». En revanche, c'est plutôt l'inverse pour la période « 23-39 mois ». Les bagasses seraient-elles en concurrence avec les Ingas pour ce qui est de la ressource en eau lors d'année plus sèche ?

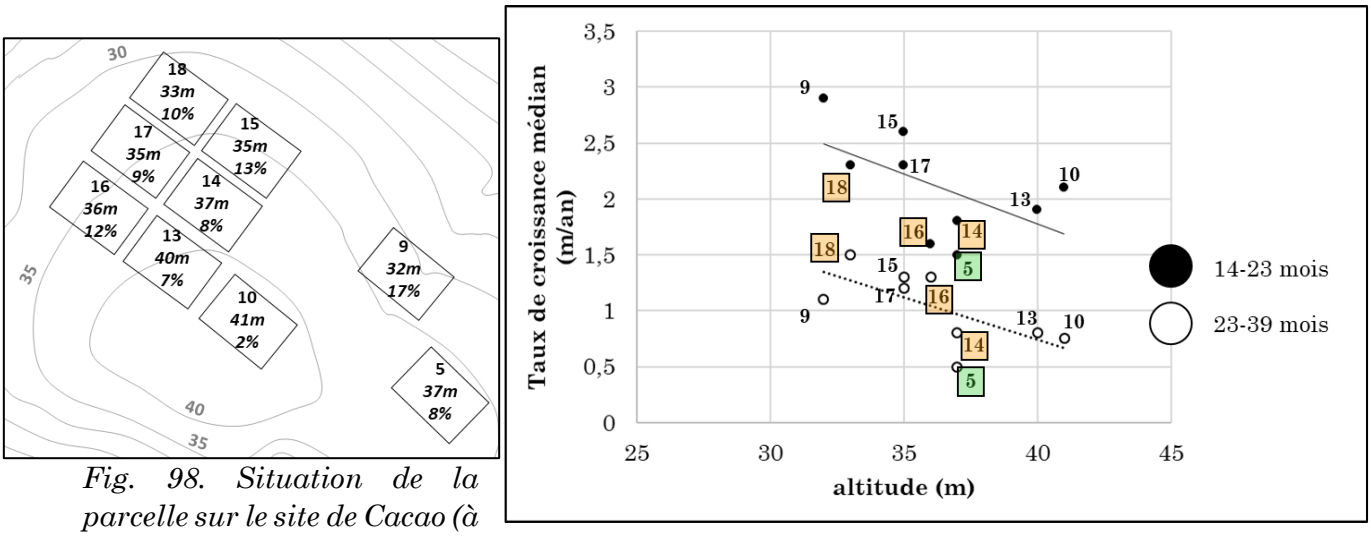


Fig. 98. Situation de la parcelle sur le site de Cacao (à gauche) et évolution du taux de croissance médian des Bagasses en fonction de l'altitude moyenne des placettes (à droite). La carte à droite situe les placettes sur la topographie du site de Cacao. Chaque cadre représente une placette avec son numéro, son altitude moyenne et sa pente moyenne. Sur le graphe de gauche, les chiffres indiquent les numéros des placettes ; carré vert : placette avec S. guianensis ; carré orange : placette mixte Inga-Bagasse ; pas de carré : Bagasse pure.

<u>Pour les Cordias</u>, espèce native de Guyane, seulement 2 séquences de développement ont pu être mises en évidence pour les 3 placettes (Fig. 99) : une séquence pour les 2 placettes Cordia 3 et Cordia 4, et une séquence pour Cordia 11 plantée avec couvert herbacé de *S. guianensis*. Pour les placettes 3 et 4, les taux de croissance en hauteur sont relativement constants au cours des 2 premières années. Pour la placette 11 avec couvert herbacé, les taux de croissance en hauteur lors de la première année sont bien plus bas jusqu'à ce qu'ils expriment une accélération notable en 2ème année. En fin de seconde année, les arbres de cette placette 11 ont rattrapé les arbres des 2 autres placettes malgré la présence du couvert herbacé. En revanche, en 3ème année, les taux de croissance chutent drastiquement pour les 3 placettes et ce ralentissement fort correspond à la période très pluvieuse 2021/2022.

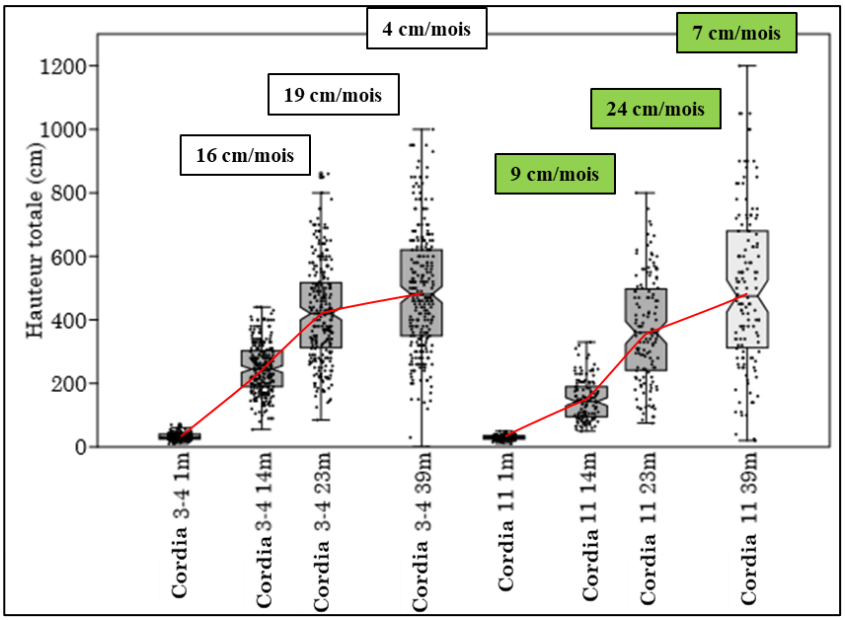


Fig. 99. Box plots de la hauteur totale des Cordias sur les 3 placettes (Cordia 3, Cordia 4 et Cordia 11) à différentes dates d'inventaire (à 1, 14, 23 et 39 mois ; respectivement 1m, 14m, 23m et 39m).

Par ailleurs, de nombreux arbres de cette espèce n'ont pas de très bons états sanitaires (Tab. 6). **Aucune différence significative de hauteur totale des arbres n'a pu être mise en évidence entre les 2 provenances plantées, Saul et Costa Rica**.

Tab. 6. Etats sanitaires des Cordias vivants des 3 placettes de Cacao.

	sain	souffreteux	dépérissant
Cordia 3	16 %	55 %	29 %
Cordia 4	33 %	50 %	17 %
Cordia 11	43 %	37 %	20 %

Pour les Niangons, seulement 2 séquences de développement ont pu être mises en évidence pour les 3 placettes : une séquence pour les 2 placettes Niang 1 et 6, et une séquence pour le placeau Niang 8 planté avec couvert herbacé de *S. guianensis* (Fig. 100). Pour les placettes 1 et 6, les taux de croissance en hauteur augmentent sensiblement d'une période à l'autre pour se stabiliser autour de 14 cm/mois lors de la dernière période très pluvieuse 23-39 mois. Pour les arbres de la placette 8 qui expérimentent la concurrence du couvert herbacé de *S. guianensis*, les taux de croissance en hauteur sont significativement bien plus faibles dès le départ, mais ils connaissent aussi une progression positive, puis se stabilisent autour de 10 cm/mois au cours de la dernière période très pluvieuse. L'état sanitaire des Niangons est excellent avec 98 % d'individus sains pour les 3 placettes.

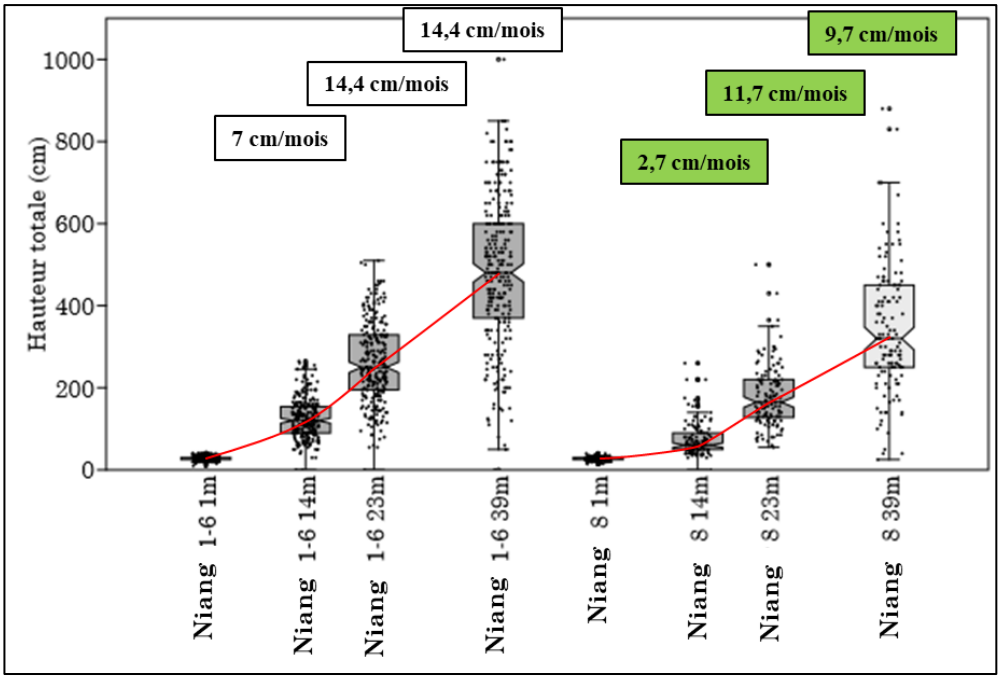


Fig. 100. Box plots de la hauteur totale des Niangons sur les 2 placettes sans couvre sol (Niang 1 et 6) et sur la placette avec couvre sol (Niang 8) à différentes dates d'inventaire (1, 14, 23 et 39 mois ; respectivement 1m, 14m, 23m et 39m).

Pour les Ingas, à partir de la comparaison des taux de croissance successifs de ces 3 placeaux, 2 groupes ont été identifiés, le groupe 14-16 et le groupe 18 (Fig. 101). Les 2 ensembles ont à peu près le même comportement. Les arbres expriment des taux d'accroissement assez constants d'une période à l'autre. Leur état sanitaire est excellent (100% d'individus sains) et leur développement est optimal !

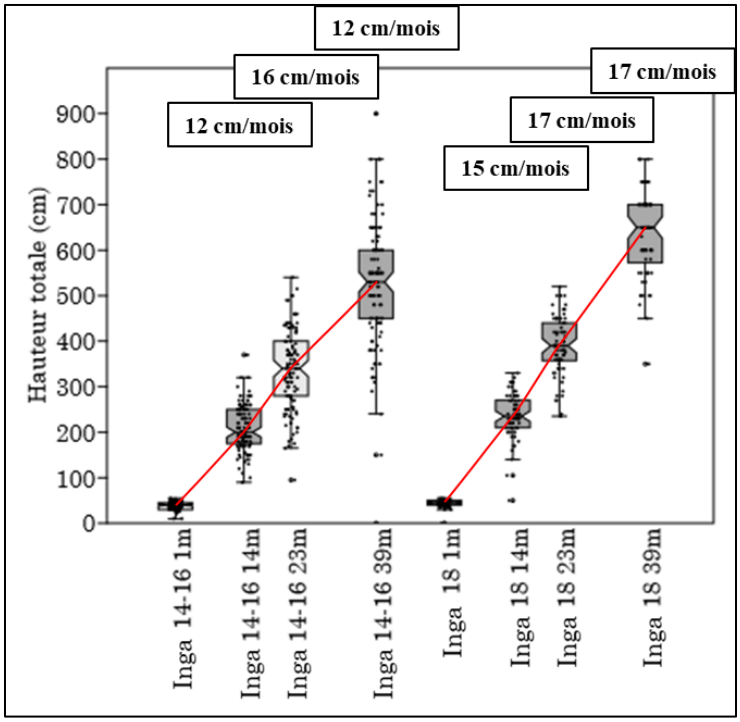


Fig. 101. Box plots de la hauteur totale des Ingas sur les 3 placettes plantées (Bag 14, 16 et 18) à différentes dates d'inventaire (à 1, 14, 23 et 39 mois ; respectivement 1m, 14m, 23m et 39m).

C/ Synthèse.

A la différence des sites de Regina et de Paracou, les arbres de la parcelle de Cacao ont été plantés 18 mois après le début de la défriche. Celle-ci avait été réalisée en saison des pluies. Les arbres ont été plantés au milieu de la grande saison des pluies (mai) au cours de l'année 2019 qui sera la moins arrosée (< 3000 mm) des 5 années de suivi (2018 à 2022). Au moment de la plantation, Il y avait très peu de mulch sur le sol. C'est aussi la parcelle qui a eu les plus faibles taux de mortalité.

D'une manière générale, la figure 102 offre une vision instantanée à 39 mois de la distribution des arbres « sains » tout en distinguant différents taux de croissance annuelle en hauteur (points rouges : arbres sains avec croissance en hauteur ≥ 1,8 m/an ; points noirs: arbres sains avec croissance en hauteur allant de 1 à 1,8 m/an).

Les Tecks sont pratiquement absents et les Cordias ne sont pas très nombreux.

En revanche, Niangons et Ingas occupent sont quasiment tous recensés et ils poussent fort.

Enfin, les Bagasses sont intermédiaires au travers de l'existence de zones plus importantes d'absence de bagasses saines, mais aussi de taux de croissance plus modestes à 39 mois.

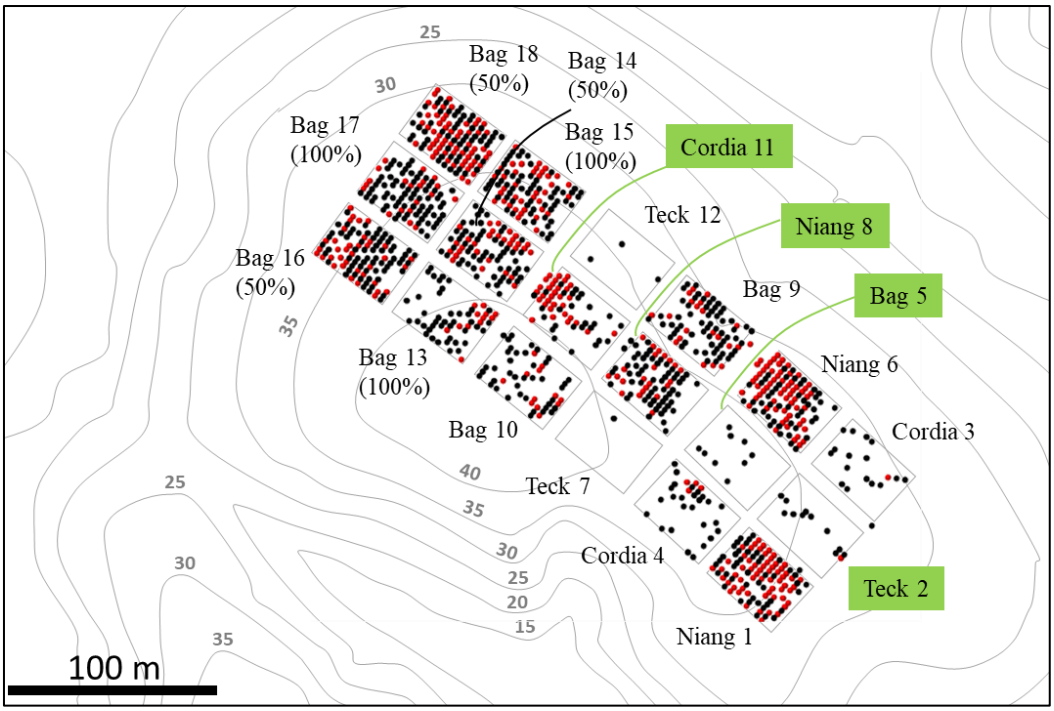


Fig. 102. Distribution des arbres sains sur la parcelle de Cacao. Points rouges : croissance annuelle en hauteur ≥ 1,8 m/an : points noirs : croissance annuelle en hauteur ceux qui ont une croissance comprise entre 1 m et 1,8 m/an.

Bagasses. Les Bagasses ont exprimé une dynamique de croissance aussi élevée que celle observée à Regina. C'est aussi l'espèce qui a les plus faibles valeurs de coefficients de variation, signe que l'espèce est à particulièrement à l'aise dans ce contexte pédoclimatique. **Toutefois, cette espèce n'a pas apprécié l'excès de pluviométrie en 2021 et 2022 dans les emplacements intrinsèquement plus humides de la parcelle**.

Cordias. Pour rappel, les Cordias plantés à Cacao sont originaires de Saul (Guyane) et du Costa Rica. Les arbres de ces 2 origines expriment des taux de croissance aussi importants que ceux observés à Regina même s'ils ne sont pas de la même origine. Sur la placette couverte de *S. guianensis*, les arbres se sont partiellement affranchis de la compétition avec le couvre sol et expriment maintenant les taux de croissance les plus importants. Ces arbres montrent aussi la même sensibilité aux conditions pédologiques que sur les 2 autres parcelles (coefficient de variation : 37 à 50%) : des développements divers, parfois assez bas sur certaines zones plus contraignantes et des états sanitaires très moyens sous très forte pluviométrie.

Tecks. A Cacao, la croissance en hauteur des tecks après plantation a été assez similaire à celle observée sur les Tecks de Paracou et significativement plus faible que celle observée à Regina. Mais comme à Paracou et à Regina, cette espèce, en dépit d'une variabilité génétique réduite des 10 clones, montre une très grande variabilité de développement des arbres sur la parcelle, si ce n'est pas la plus grande avec des coefficients de variations les plus importants observés sur cette parcelle (> 60 %). C'est aussi l'espèce qui montre le plus d'individus avec un mauvais état sanitaire, souvent défeuillés. Les taux de croissance déclinent aussi significativement. Comme sur les 2 autres parcelles, ces observations suscitent une interrogation sur l'adaptabilité du Teck aux conditions pédoclimatiques de la parcelle de Cacao. Caractères physico-chimiques des sols du site et/ou excès

évidents de pluie ces 2 dernières années (2021, 2022) ? Ces 2 aspects ne sont pas exclus dans la formulation de cette hypothèse.

Niangons. C'est sur la parcelle de Cacao, que les Niangons se comportent le mieux en termes de survie et de croissance. C'est sur une des 3 parcelle semée de *S. guianensis* que les Niangons ont exprimé les plus faibles taux de croissance : en première année, les Niangons ont eu à souffrir de la concurrence imposée par le couvert herbacé de *S. guianensis*. Mais à présent, les arbres se sont enfin affranchis de la compétition avec le couvre sol. Par ailleurs, les Niangons des 2 autres placettes expriment le plus fort taux de croissance médian de la parcelle de Cacao sur la période 23-39 mois (Fig. 103).

Pois sucré. *Inga edulis* est une espèce qui s'est très bien comportée sur le site de Cacao ! C'est aussi celle qui montre les plus faibles coefficients de variation avec les Bagasses. Il est utile de rappeler aussi que cette espèce a aussi bénéficié d'une fertilisation de fond à la plantation. Dans plusieurs parcelles, les couronnes se touchent et le couvert végétal est complet, contraignant maintenant le développement du recru adventif.

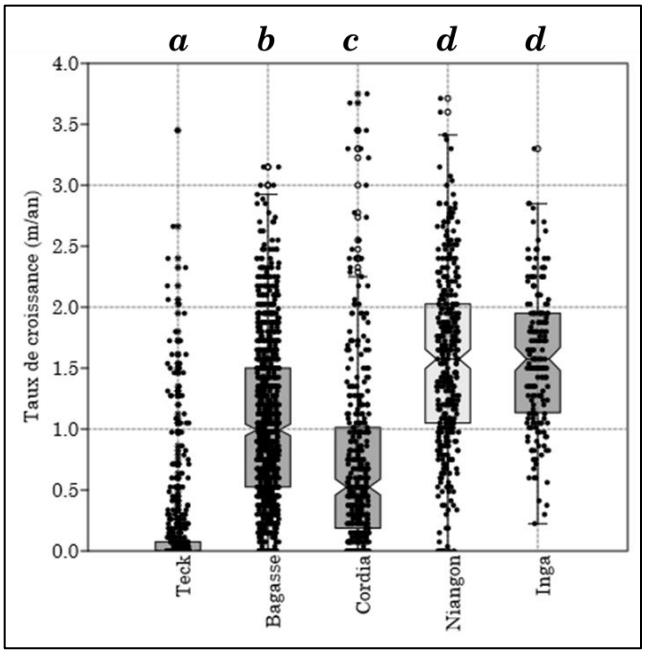


Fig. 103. Taux de croissance en hauteur des 5 espèces plantées sur le site de Cacao pour la période 23-39 mois.

4 – Discussion générale.

Au terme de la présentation de la croissance sur les 3 sites, il est possible maintenant de tirer des enseignements de cet essai pour ce qui concerne le développement des 5 espèces et leurs préférences pédoclimatiques, ainsi que les itinéraires à employer. Nous disposons à présent d'un ensemble d'informations de différentes natures qui nous permettent de nous faire une meilleure idée qu'auparavant du comportement des espèces plantées en fonction de divers éléments :

- Le contexte pédoclimatique et son évolution au cours du temp,
- La plage d'observation dont la longueur varie selon les sites,
- Les observations antérieures à ce projet pour ces mêmes espèces sur des sites plantés antérieurement (1978, 1984 à 1986, 2000).

Effet du contexte pédoclimatique (site, sol, pluviométrie) et des itinéraires sur la croissance des arbres. D'une manière générale, c'est sur les sites de Regina et de Cacao que les croissances en hauteur ont été les plus importantes, tandis qu'elles ont été les plus basses sur le site de Paracou (Tab. 7), site sur lequel, les arbres ont eu à subir les attaques des fourmis Atta.

				1 an	2 ans	3 ans	4 ans	Etat	Clas
Bagasse	Ferralsols	Regina		2,1	5	7,5	10	++	2
				2,9	5,2	8	9,4	+	1
		Cacao		1,8	3,2	3,8	/	-	7
				3,2	4,6	5,8	/	-	4
				3,2	5,1	7	/	++	3
	Acrisols	Paracou		1,8	2,6	3,2	/		8
				2,2	3,4	4	/		6
				2,5	3,5	5,2	/		5
Cordia	Ferralsols	Regina		1	3	5,9	7,4	++	1
				1,1	2,5	5,2	6,8	++	2
		Cacao		1,7	3,7	4,7	/	+	4
				2,3	4,2	4,8	/	-	3
	Acrisols	Paracou		1,2	2,4	3,3	/	++	6
				1,8	3	3,5	/	+	5
Niangon	Ferralsols	Regina		1	1,8	4,3	7,4	++	2
		Cacao		0,6	1,7	3,3	/	++	3
				1,1	2,3	4,8	/	++	1
	Acrisols	Paracou		0,7	1,3	2,4	/	++	5
				1	2	3	/	+	4
Teck	Ferralsols	Regina	†	2,9	3,9	2,2	1,1	- -	6
				2,9	6	5,9	3,4	-	2
				3,4	7,8	7,8	6,5	- -	1
		Cacao		0,8	1,4	1,2	/	- -	7
			*	1,3	2	1,1	/	- -	8
				2,1	2,9	2,2	/	- -	6
				2,5	4,2	2,2	/	- -	6
	Acrisols	Paracou		1,7	2,7	3,2	/	- -	5
				2,6	3	3,4	/	- -	4
				2,4	3,4	3,7	/	- -	3
Inga	Ferralsols	Regina	*	0,4	0,8	0,6	0,9	+	8
			*	0,6	1,2	1,2	1,5	+	6
			*	0,7	1,1	1,8	2,4	+	7
		Cacao		2	3,4	5,9	/	++	2
				2,3	3,9	6,5	/	++	1
	Acrisols	Paracou		1,5	2,4	/	/	++	5
				1,8	2,8	/	/	++	4
				1,7	3,3	/	/	++	3

*Tab. 7. Hauteur médiane et état sanitaire des arbres en fonction de la nature des sols, du site, de la présence ou non d'un couvre sol de Stylosanthes guianensis et de l'apport de fertilisants pour les 5 espèces plantées. * Non fertilisé ; fond vert : avec Stylosanthes guianensis ; état sanitaire : ++ très bon, + bon, - moyen, - - mauvais. Pour faciliter la lecture, un classement (colonne « Clas ») des performances de hauteur médiane atteinte est établi pour chaque espèce plantée, en allant des meilleures (Clas. 1 ; en bleu) aux moins bonnes (Clas. 8 : en rouge ; classements intermédiaires : orange).*

Regina. A âge comparable (3 ans ; Tab. 7), et passée la barrière des éléments grossiers (EG), c'est sur les Ferralsols du site de Regina que les arbres ont connu les plus forts développements. Quand cela ne l'est pas, c'est que (1) l'itinéraire ne convenait pas : c'est clairement le cas des Ingas qui n'ont pas reçu de fertilisant à la plantation à la différence des 4 autres espèces, ou bien (2) que les sols sont des Acrisols mal drainés de bas de pente comme cela est le cas pour un placeau de Teck (Tab. 7).

Cacao. Les Ferralsols du site de Cacao ont aussi donné de bons résultats, mais légèrement en deçà de ceux de Regina. Toutefois, les différences entre ces 2 sites ne sont pas toujours claires, et le site de Cacao peut parfois montrer de meilleurs résultats que ceux enregistrés sur le site de Regina, comme cela est le cas pour les Niangons (Tab. 7). Quand le site de Cacao montre des résultats bas, c'est que l'itinéraire ne convenait pas comme cela est le cas pour une partie des Tecks qui n'ont pas reçu de fertilisant à la plantation.

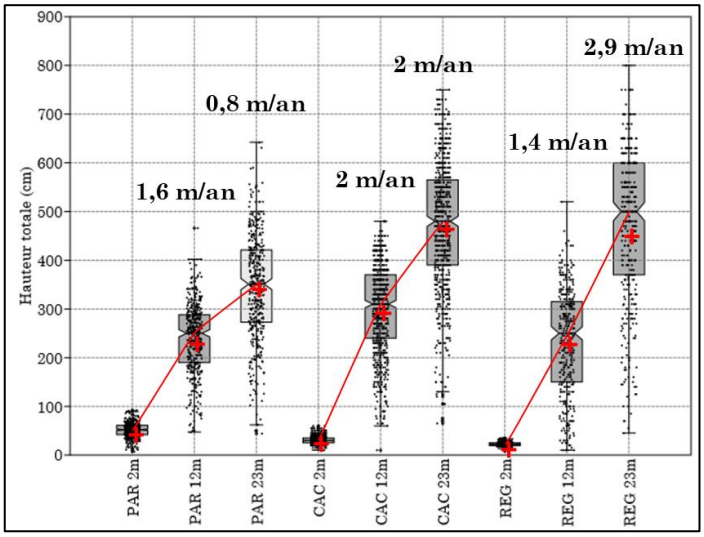
Sur le site de Cacao, ce sont les placettes avec couvre-sol de *Stylosanthes guianensis* qui ont les performances systématiquement moins importantes que celles des placettes sans couvre-sol de *S. guianensis*. Cette constatation pour le site de Cacao souligne un peu plus les très bonnes performances observées sur les Ferralsols de Regina, site où 12 placettes concernant les 4 espèces à vocation bois d'œuvre (Bagasses, Cordias, Niangons et Tecks) ont été plantées avec couvre-sol de *S. guianensis,* contre seulement 4 placettes plantées avec *S. Guianensis* à Cacao. Ainsi, même avec couvre-sol de *S. guianensis*, les arbres de Regina réalisent de meilleurs performances que les arbres de Cacao.

Il est utile de rappeler que les sols de Cacao sont moins aérés et plus argileux que ceux de Regina. Ces sols sont-ils plus propices à la saturation en eau lors des épisodes pluvieux remarquables de 2021 et 2022 ? Il faut aussi rappeler que le recru natif est bien plus agressif qu'à Regina. La compétition pour les nutriments, imposée par le recru, pourrait-elle expliquer les moins bonnes performances sur la parcelle de Cacao ?

Paracou. C'est sur les Acrisols de ce site que les performances sont les moins bonnes. Des sols très sableux, bien moins aérés (Chapitre 4 : Fig. 47), avec une rétention en eau et en éléments chimique (CEC) bien moindre que pour les Ferralsols, peuvent expliquer des taux de croissance initiaux bien moindres que ceux observés sur Ferralsols. Par ailleurs, le site de Paracou héberge un recru très agressif qui a pu constituer un compétiteur sérieux pour l'eau et les nutriments.

Ce premier classement Regina > Cacao >> Paracou ne doit cependant pas masquer les comportements différents exprimés par les espèces plantées sur les différents sites, ainsi que les contre-performances exprimées par certaines, et parfois dues à des contextes pouvant être ponctuellement défavorables à l'installation de l'espèce. C'est la raison pour laquelle, nous avons établi un bilan pour chaque espèce dans ce qui suit.

La Bagasse. C'est l'espèce qui a exprimé de la manière la plus durable les plus hauts taux médians de croissance en hauteur, compris entre 2,5 et 3 m/an, sur des Ferralsols drainants (Regina, Cacao) renfermant moins de 40 % de sables grossiers et moins de 10% de limons fins sur une profondeur de 1 m. Au terme de 4 ans de développement, avec une hauteur totale médiane de 10 m, c'est un quart des arbres, les plus grands, qui ont atteint des hauteurs comprises entre 11 et 15 m de haut. En revanche, la Bagasse a exprimé un taux de croissance significativement moindre (taux de croissance médian : 1,8 m/an) sur le site de Paracou, sur Acrisols drainants, mais contenant plus de 50% de sables grossiers sur 1 m de profondeur.



Comparaison des dynamiques de croissance en hauteur des bagasses sur 23 mois (23m) et sur les 3 sites de plantation du projet FTC2, Paracou (PAR), Cacao (CAC) et Regina (REG).

Malgré cette sensibilité aux variations de fertilité, la Bagasse est celle qui conserve la plus grande homogénéité de hauteur totale atteinte dans les différentes placettes plantées sur les 3 sites. Cette homogénéité intra-placette peut être exprimée par le coefficient de variation (CV) qui a les valeurs observées les plus basses chez cette espèce : à surface constante des placettes (~ 1700 m²), et en considérant que le niveau de variabilité édaphique est de même ordre sur l'ensemble des placettes du dispositif, les valeurs de CV comprises entre 20 % et 40 % (médiane : 30 %) chez la Bagasse peuvent signifier que cette espèce est la moins sensible aux variations édaphiques qui ont cours sans pour autant connaître la stratégie par laquelle, cette espèce « compense » les variations édaphiques. A surface de placettes équivalente, le CV de la hauteur totale des arbres peut être considéré comme un « indice de confort » de développement de l'espèce. Il est utile ici de préciser que cette homogénéité n'est pas altérée par les 3 différentes provenances plantées pour la Bagasse.

La bagasse est très sensible à l'hydromorphie temporaire qui a détruit de nombreux plants au stade « petit plant » (20 à 30 cm de haut) peu de temps après la plantation sur certaines placettes des parcelles du dispositif « Forestreeculture 2 » Paracou et Regina : la plupart des plants d'une zone affectée ne grandissent pas, jaunissent, se défeuillent, puis finissent par mourir rapidement. C'est aussi ce qui s'est produit dans une ancienne placette de Bagasses plantées en mai 1984 sur le dispositif « essais d'essences locales » de Paracou (Voir Chapitre 4) : une

mortalité précoce dans les 2 années suivant la plantation pour des plants qui présentaient des problèmes de comportement (croissance très faible, plants jaunissants et/ou dessèchement des feuilles) avant que 74 % des arbres ne meurent (Fig. 109). Dans ces zones où quasiment tous les plants disparaissent rapidement, différents éléments peuvent être associés :

- Une augmentation importante de la proportion de limons avec la profondeur (à partir de 100 cm ou bien avant ; Paracou FTC 2),
- Une augmentation modérée de la proportion de limons avec la profondeur (à partir de 100 cm) couplée à un épisode pluviométrique très fort à la plantation (1000 mm en mai 1984 ; Paracou « essai essences locales »),
- Un compactage des sols de surface couplé à un épisode pluviométrique fort et prolongé (~ 3500 mm de janvier à juin 2018 ; Regina FTC2).

Cette sensibilité à « trop d'eau » est aussi perceptible plus tard, quand les arbres ont pu se développer correctement et atteindre des dimensions plus importantes (hauteur totale > 7 m). Cette sensibilité se traduit par une défeuillaison plus ou moins importante, parfois totale. Cette réaction s'accompagne aussi d'un ralentissement de la croissance en hauteur, parfois même l'arrêt complet quand la défeuillaison est totale (Fig. 49). Des parties de houppier peuvent même se dessécher. Quelques arbres peuvent dépérir rapidement avant de se dessécher. Dans ces zones où les arbres ont pu connaitre une croissance rapide durant plusieurs années après plantation, différents éléments peuvent être associés :

- La proximité de zones compactées hydromorphes couplée à un épisode pluviométrique très fort et prolongé (~ 6000 mm en 2022 ; Regina FTC2).
- Une teneur en argile comprise entre 40 et 50% couplée à un épisode pluviométrique très fort et prolongé (~ 6000 mm en 2022 ; Cacao FTC2).

Ainsi, dans ces zones à Ferralsols bien drainant mais aussi assez argileux, la pluviométrie très importante de l'année 2022 a considérablement engorgé les sols, surtout ceux du site de Cacao, plus argileux. Cet évènement pluviométrique a constitué un véritable stress hydrique inverse : trop d'eau ! Il faut aussi rappeler que ces espaces nouvellement plantés sont encore recouverts d'une végétation très ténue, incapable « d'assécher » le sol comme peut le faire un couvert mature de forêt naturelle tropicale. Ainsi, les épisodes pluviométriques importants, même sur des sols considérés comme drainant, même s'ils ne génèrent pas d'érosion en raison de l'existence de mulch et de plantes rudérales laissées en place, constituent de réels écueils temporels imprévisibles qui peuvent engorger durablement les sols et affecter significativement les jeunes Bagasses plantées.

Cette situation observée en 2022 contraste avec celle observée sur 2 anciennes placettes de Bagasses du site de piste Christine. Sur ce site où les Bagasses plantées en 2000 dépérissent en 2016 (Fig. 106), nous faisons l'hypothèse que sur des sols mal drainant, les Bagasses souffrent à présent d'un véritable stress hydrique, c'est-à-dire pas assez d'eau en grande saison sèche. Différents éléments peuvent être associés à cette situation :

- Une augmentation très importante de la proportion de limons en profondeur dès 50 cm (Piste Christine ; Fig. 104) couplée à l'installation dramatique d'un recru secondaire mal maitrisé.

La Bagasse est une espèce que nous avons observé croître activement en hauteur en grande saison sèche. Pour cela, elle est capable de déployer un système racinaire très traçant pour aller chercher l'eau loin, mais aussi profondément de manière précoce (130 cm de profondeur sur Regina) pour accéder à des couches de sols plus humides : comme un figuier ! C'est une *Moraceae* !

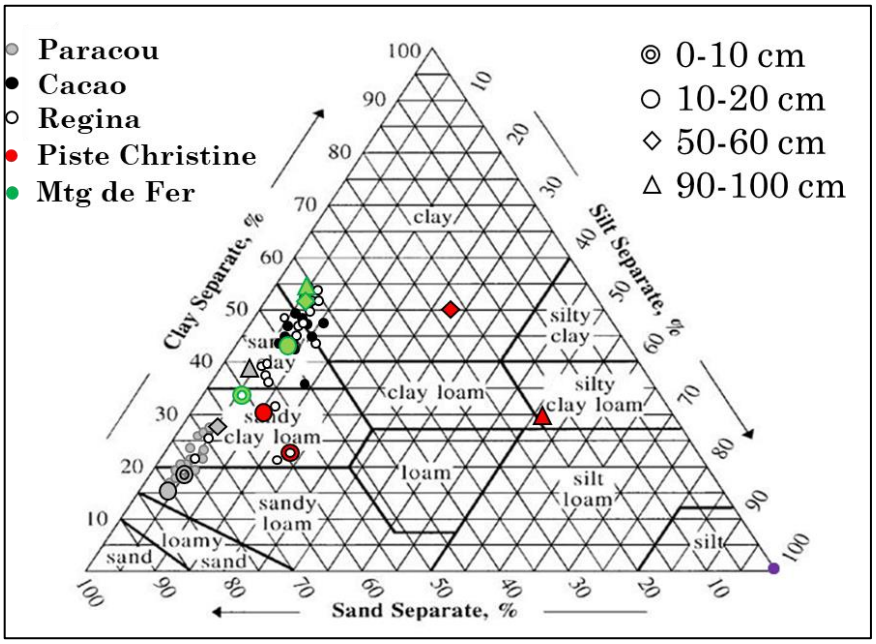


Fig. 104. Triangle des textures comparant la composition granulométrique des sols à différentes profondeurs de différents sites sur lesquels des Bagasses ont été plantées : 2000-2002 (Piste Christine et Montagne de Fer) et 2018-2019 (Regina, Paracou et Cacao).

C'est une espèce qui requière des sols profonds drainants pour pouvoir s'établir durablement. Sur le site de « Piste Christine », sur des sols à drainage vertical contraint en raison d'un pourcentage élevé de limons (> 20% ; Fig. 104) dès 50 cm de profondeur, les bagasses ne parviennent pas à s'établir profondément après 15 ans de croissance (Nicolini & Morel 2016) comme le montre la figure 105 (profil de sol de gauche) : les Bagasses enracinées superficiellement dans ce profil de plus en plus limoneux ne disposent que d'environ 60 cm d'épaisseur de sol et de sa réserve d'eau pour se développer et affronter le stress hydrique de la grande saison sèche. Cette situation convenait au développement des Bagasses tant que celles-ci Bagasses étaient jeunes et de petites dimensions dans une parcelle entretenue : effectivement, les bagasses ont pu se développer correctement ! En revanche, avec la prise de hauteur et l'augmentation des besoins, la quantité d'eau disponible dans cette couche de sol fine doit devenir rapidement limitée, (1) surtout en grande saison sèche et (2) quand la ressource en eau est partagée avec une végétation secondaire devenue puissante et bien installée comme cela était le cas en novembre 2016 (Fig. 106). Dans cette situation compliquée, les bagasses souffrent de stress hydrique chronique et dépérissent. En revanche, des bagasses de même âge, aussi plantées sur le site de Montagne de Fer, sur des sols avec très peu de limons et à drainage vertical libre, avaient un enracinement bien plus profonds (Fig. 105 ; profil de sol de droite) et un développement normal.

Fig. 105. Profils pédologiques de 1 m de profondeur dans 2 plantation de Bagasses : sur le site de Piste Christine (à gauche) et sur celui de Montagne de fer (à droite). Notez l'abondance racinaire et l'enracinement profond sur le site de Montagne de fer.

Fig. 106. Aspects du houppier de Bagasses plantées, âgées de 15 ans sur le site de Piste Christine. Si quelques rares bagasses présentaient un beau houppier (arbre de gauche), la grande majorité montraient un dépérissement avancé (arbres de droite) au moment des observations.

Cette hypothèse d'une compétition pour l'eau en grande saison sèche est pertinente puisqu'elle a pu être vérifiée avec un autre type de couvert végétal accompagnateur : une légumineuse couvre-sol, *Stylosanthes guianensis*. Sur les 3 sites du dispositif FTC2 (Regina, Paracou et Cacao), les Bagasses ont subi de manière significative la concurrence du couvert herbacé de *Stylosanthes guianensis* à la plantation. Sur les 3 sites, les Bagasses associées à *S. guianensis* poussent moins vite en hauteur au cours de la première année et ce, particulièrement en grande saison sèche (démonstration sur le site de Regina).

Néanmoins, les arbres parviennent toujours à dépasser cet obstacle car leur reprise après plantation est rapide au travers d'une installation caulinaire, mais aussi d'une installation racinaire profonde. La mise en place de racines profondes par la Bagasse fait que celle-ci se place rapidement hors stress hydrique et mais aussi hors concurrence. C'est d'ailleurs une espèce que nous avons observée croître activement en hauteur en grande saison sèche.

Plus tard, la Bagasse tire profit de l'association avec *S. guianensis*, notamment sur le site de Regina, site sur lequel nous avons démontré que les arbres croissant avec *S. guianensis* captent bien de l'azote fixé par *S. guianensis*, et qu'ils poussent significativement plus vite en hauteur et en épaisseur que ceux non associés avec *S. guianensis*.

La Bagasse est une espèce qui affectionne l'eau, mais point trop. A Tomé-Açu (Brésil, état du Parà), un agriculteur brésilien reconnue, Mr Mishimori Konagano, a observé que les Cacaoyers plantés sous les Bagasses souffraient beaucoup de stress hydrique, bien plus que sous d'autres espèces forestières. Cette association Bagasses-Cacaoyers a d'ailleurs été abandonnée.

Quel est l'avenir de ces Bagasses plantées sur les différents sites de Guyane ? Atteindront-elles des diamètres exploitables (> 30cm) ? Seront-elles nombreuses à le faire ? A ce jour, nous n'avons jamais observé en Guyane de parcelles plantées de Bagasses ayant atteint l'âge de 30 ans et remarquables tant par les effectifs conservés (faible mortalité) que par le stade de développement atteint par les arbres (DBH moyen ≥ 30 cm). Nous ne disposons actuellement que de quelques expériences d'âges différents qui ont connu des succès très divers (Tab. 8).

Lieu	Année de plantation	Année de relevé	Nb arbres plantés	Survie (%)	sols	situation
EGY	1981	1984	206	0	Acrisols	?
PAR $_{32\ ans}$	1984	2016	49	26	Acrisols	Découvert
CHR $_{18\ ans}$	2000	2016	128	61	Acrisols	Découvert
KAW $_{18\ ans}$	2000	2018	282	58	Ferralsols	Découvert
MDF $_{16\ ans}$	2000	2016	774	39	Ferralsols	Abri latéral
REG $_{4\ ans}$	2018	2022	1228	70	Ferralsols	Découvert
PAR $_{3\ ans}$	2018	2021	1029	86	Acrisols	Découvert
CAC $_{3\ ans}$	2019	2022	1228	90	Ferralsols	Découvert

Tab. 8. Liste de différents sites plantés de Bagasses. EGY : arboretum de l'Egyptienne ; PAR : site de Paracou ; CHR : Piste Christine ; KAW : Montagne de Kaw ; MDF : Montagne de Fer ; REG : site de Regina ; CAC : site de Cacao.

Les cartes suivantes (Fig. 106 à 109) présentent à titre informatif la situation au dernier inventaire réalisé sur quelques-unes de ces parcelles plantées de Bagasses entre 1981 et 2001.

Sur le site de Montagne de Fer (Fig. 106) doté de Ferralsols profonds drainants, le diamètre médian à 1m30 des arbres âgés d'une quinzaine d'années est de 13 cm. les Bagasses saines les plus développées (points rouges) sont éparses et très sous-représentées compte tenu du nombre initial de Bagasses plantées sous abri latéral (nombreux dégâts d'abattage lors du retrait du couvert) et n'ayant pas pu bénéficier d'entretiens réguliers (entretiens mécanisés proscrits sur ce site encombré de gros bois).

Sur le site de Kaw (Fig. 107) doté de Ferralsols profonds drainants, le diamètre médian à 1m30 des arbres âgés de 17 ans est de 14 cm. les Bagasses saines les plus développées (points rouges) sont bien réparties et bien représentées sur ce site planté en plein découvert.

Sur le site de Piste Christine (Fig. 108) doté de sols à drainage bloqué, le diamètre médian à 1m30 des arbres âgés d'une quinzaine d'années est de 9 cm. C'est la valeur la plus faible de ce dispositif mis en place dans les années 2000. Les Bagasses saines les plus développées (points rouges) sont sous-représentées et très localisées sur ce site planté en plein découvert mais n'ayant pas pu bénéficier d'entretiens réguliers (entretiens mécanisés proscrits sur ce site encombré de gros bois).

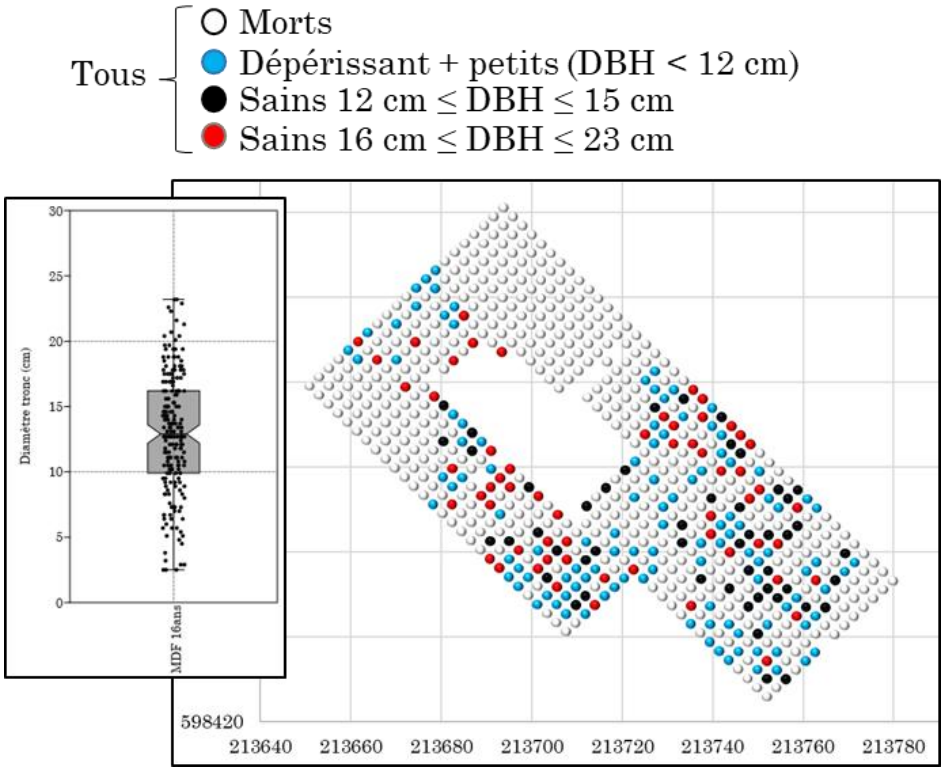


Fig. 106. Survie et diamètre basal (cm) des Bagasses âgées de 16 ans du site de la Montagne de Fer. Les points rouges et noirs n'incluent pas les Bagasses dépérissant.

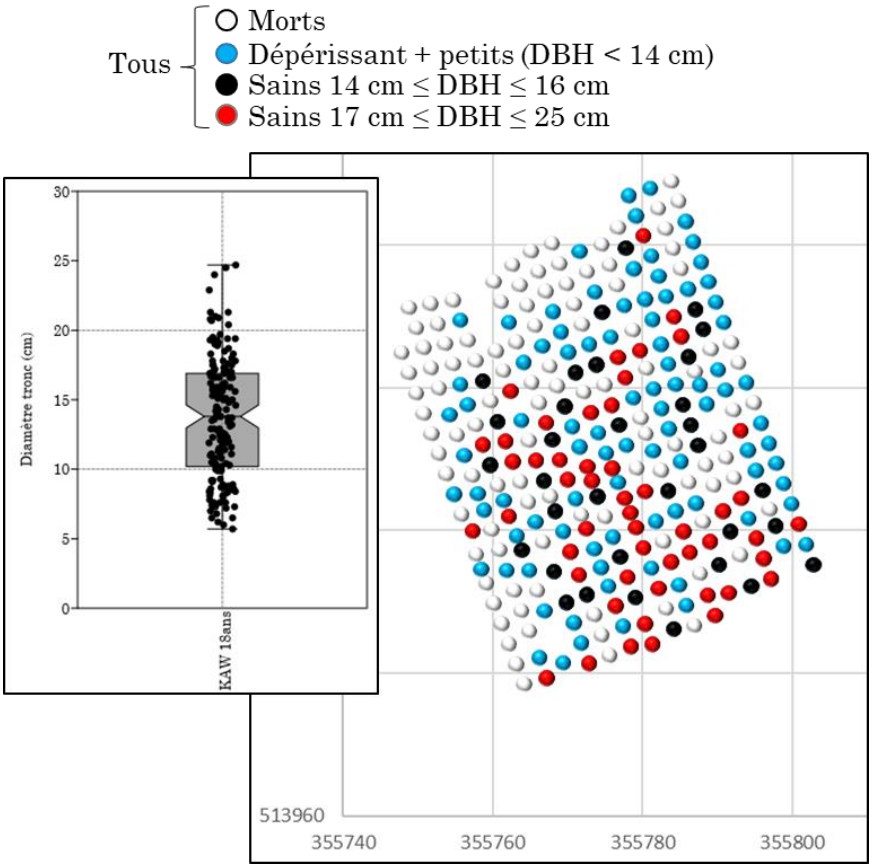


Fig. 107. Survie et diamètre basal (cm) des Bagasses âgées de 16 ans du site de la Montagne de Kaw. Les points rouges et noirs n'incluent pas les Bagasses dépérissant.

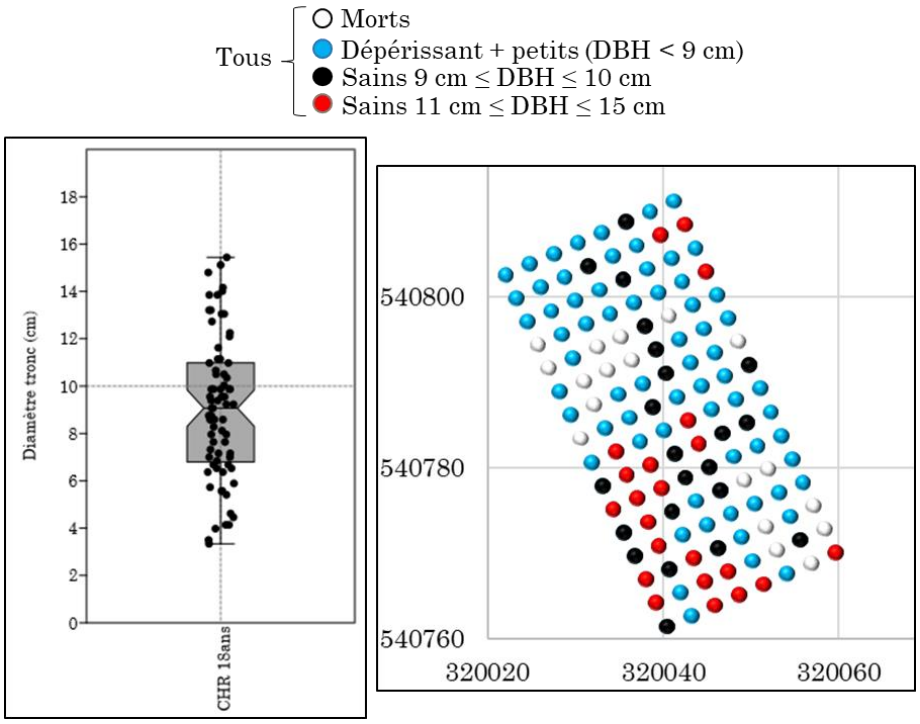


Fig. 108. Survie et diamètre basal (cm) des Bagasses âgées de 16 ans sur 2 placettes jointives du site de Piste Christine Les points rouges et noirs n'incluent pas les Bagasses dépérissant.

Sur l'essai « essences locales » de Paracou (Fig. 109) doté de sols à drainage partiellement bloqué, le diamètre médian à 1m30 des rares arbres survivants âgés

d'une trentaine d'années est de 20 cm, ce qui est plutôt faible. Les Bagasses saines les plus développées (points rouges et noirs) sont localisées en bas de pente sur des zones plus humides en saison sèche sur ce site qui a été régulièrement entretenu.

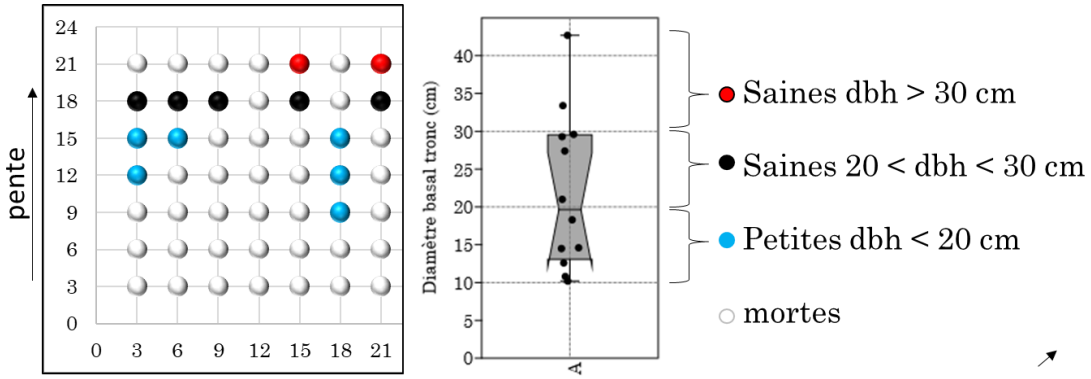


Fig. 109. Survie et diamètre basal (cm) des Bagasses âgées de 30 ans sur la placette de l'essai d'essences locales de Paracou. Les points rouges et noirs n'incluent pas les Bagasses dépérissant.

La figure 110 rend compte d'une autre manière du résultat de ces différentes expérimentations au travers de la hauteur totale et du diamètre relevés lors des derniers inventaires.

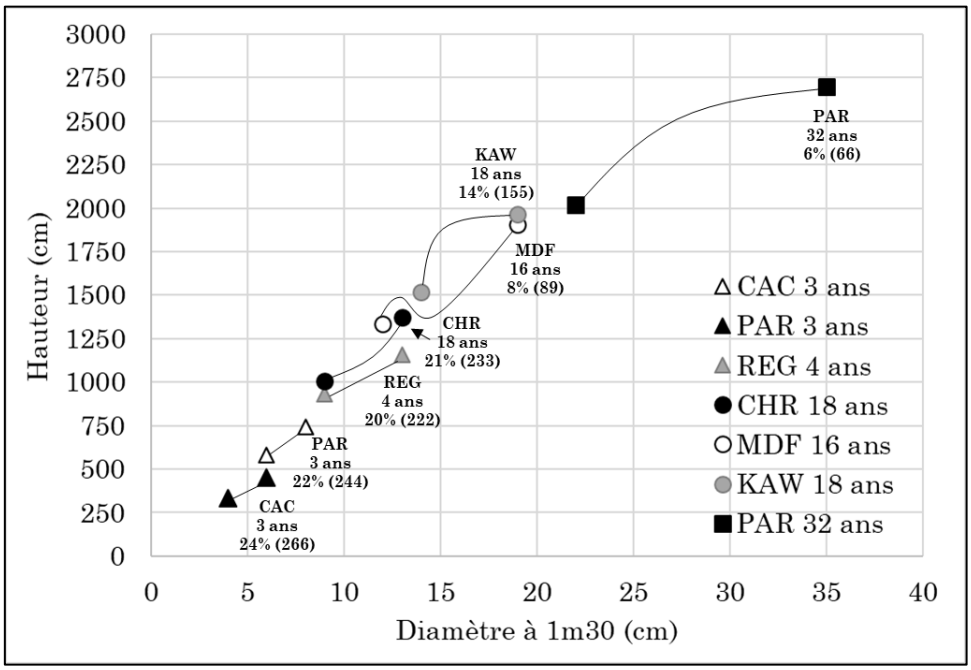


Fig. 110. Hauteur et diamètre à 1m30 des Bagasses dans des plantations d'âges différents. PAR : Paracou ; CHR : Piste Christine ; KAW : Montagne de Kaw ; MDF : Montagne de Fer ; REG : Regina ; CAC : Cacao. Pour chacun des sites, 2 points sont représentés et reliés : le premier point (à gauche) indique la valeur moyenne de tous les arbres vivants, tandis que le second point (à droite) indique la valeur moyenne des 25% plus gros individus vivants. Pour chaque site, le nom et l'âge sont renseignés. Sont renseignés aussi : la quantité des 25% plus gros arbres vivants sur l'effectif initial planté en pourcentage, mais aussi en nombre d'arbres par hectare pour un maillage de 3mx3m, ce qui équivaut à un effectif théorique de 1111 arbres plantés par hectare.

$PAR_{32\ ans}$ sur Acrisols profonds à drainage ralenti révèle que quelques Bagasses plantées en mai 1984 ont pu atteindre 30 cm de diamètre et plus à 32 ans sur une petite parcelle (49 individus) qui a souffert d'une forte mortalité à la plantation en raisons de très fortes pluies à ce moment-là.

KAW_{18ans} sur Ferralsols profonds drainant montrent qu'à mi-parcours l'atteinte d'un diamètre de 30 cm et plus est tout à fait envisageable par un grand nombre d'arbres qui maintiennent en moyenne au moins 1 cm/an d'accroissement sur le diamètre. **La placette KAW_{18ans} fournit en quelque sorte l'image d'un espace planté qui pourrait produire un nombre correct de gros arbres (155 arbres/ha) de 1 à 2 m³ de bois total chacun**.

$MDF_{16\ ans}$ sur Ferralsols profonds drainant est assez proche de KAW_{18ans} en termes de valeurs moyennes. Toutefois, $MDF_{16\ ans}$ a souffert (1) de l'existence d'un abri latéral qui a restreint le développement de nombreux individus et a occasionné des dégâts lors de son abattage, et (2) de l'encombrement de gros bois qui n'ont pas permis la mise en œuvre d'entretiens réguliers (entretien mécanisés proscrits). Dès lors, la mortalité y a été importante et les gros arbres exploitables par hectare y seront vraisemblablement bien moins nombreux qu'à Kaw.

$CHR_{18\ ans}$ sur Acrisols minces à drainage bloqué montre le retard de développement considérable que les Bagasses ont pris sur des sols très contraignants renfermant de grandes quantités de limons fins en comparaison des Bagasses de Montagne de Fer et de Kaw. Malgré l'observation de taux de croissance en hauteur élevés au cours des 5 premières années après plantation (Guitet 2005), la plupart des arbres sont en dépérissement avancé au dernier relevé (2016). Avec un accroissement diamétrique annuel moyen < 1cm, très peu de Bagasses par hectare devraient atteindre un diamètre > 30 cm en 30 ans.

REG_{4ans} sur Ferralsols profonds drainant illustre bien la dynamique d'un peuplement de jeunes bagasses qui se porte plutôt bien. Le peuplement de ce site met en exergue le retard pris sur $CHR_{18\ ans}$. : en 4 ans seulement, les arbres de REG_{4ans} ont atteint les dimensions des arbres de $CHR_{18\ ans}$. Sur la parcelle de Regina, le peuplement de Bagasses devrait emprunter le chemin déjà tracé par celui de KAW_{18ans}.

CAC_{3ans} sur Ferralsols profonds drainant plus argileux qu'à Regina, les arbres ont plus souffert de la période très pluvieuse de 2021-2022. Une question subsiste : la période très pluvieuse de 2021-2022 aura-t-elle durablement affectée la dynamique rapide commencée par ces arbres ? Le peuplement CAC_{3ans} parviendra-t-il à égaler à 4 ans le diamètre moyen de REG_{4ans} ? Peuplement à suivre !

PAR_{3ans} sur Acrisols profonds drainant et renfermant plus de 50 % de sables grossiers montrent que les arbres de ce peuplement suivent une dynamique significativement plus lente que celles de $REG_{4\ ans}$ et $CAC_{3\ ans}$. Compte tenu des dynamiques de croissance observées, nous pensons que très peu de Bagasses accèderont dans les temps aux diamètres exploitables escomptés sur ce site.

A ce jour, nous n'avons qu'une expérience très ténue du comportement de cette espèce. Si **l'acquisition de forts diamètres (≥ 30 cm) sur une durée de 30 ans est un objectif accessible**, et que nous connaissons le volume de bois d'une Bagasse en fonction de son diamètre (Nicolini et Morel 2016), nous ne savons pas combien de Bagasses exploitables pourront être accueillies par hectare de plantation, les limitations pouvant venir de l'encombrement des couronnes, du contexte pédoclimatique (qualité des sols et régime pluviométrique) changeant et de la disponibilité des ressources (azote, eau).

Au terme de cette étude, il s'agit à présent de **poursuivre le suivi des Bagasses plantées à Regina et Cacao** afin d'observer les répercussions de ces 2 années de pluviométrie largement excédentaires 2021 et 2022 sur le développement des arbres. Il s'agit ici de vérifier si les Bagasses reprennent leur dynamique de croissance qui a été significativement affectée par cet épisode exceptionnel.

Dans un même temps, il s'agira de **mettre en œuvres de nouvelles expérimentations au cours desquelles, tous les opérations seront réalisées de manière à parer aux écueils (effets de l'hydromorphie, stress hydrique, etc) que nous avons pu rencontrer ponctuellement durant la durée de ce projet** et qui relevaient souvent d'écarts de préparation (retards des opérations, compactage de surface, etc) ou de bien de notre méconnaissance (précautions d'utilisation du couvre sol herbacé de *Stylosanthes Guianensis*).

La Bagasse peut être plantée avec un couvre sol herbacé de *Stylosanthes guianensis*. Le cultivar « UBON STYL » de cette espèce herbacée a un comportement et un taux de réussite remarquables en Guyane. Les services rendus par cette espèce sont exceptionnels en termes de couvre sol et de protection contre l'érosion, de décompaction de surface, de transfert d'azote et de limitation du recru natif). Ses inconvénients sont une concurrence pour l'eau au cours des premiers mois après plantation incluant la grande saison sèche et la fâcheuse tendance à recouvrir les plants « retardataires ». Dans la perspective de planter des Bagasses associées à *S. guianensis*, il s'agira de respecter scrupuleusement un calendrier d'opérations adapté à un itinéraire associant Bagasse et *Stylosanthes guianensis*. (voir chapitre 4).

Le Cordia. Le Cordia s'est aussi plutôt bien comporté sur les 3 sites en termes de survie et de croissance. Toutefois, sur nos sites, bien que certains individus puissent développer ponctuellement des taux de croissance très élevés (2,9 m/an), le taux médian de croissance en hauteur médiane de cette espèce (1,7 à 2,1 m/an) est significativement inférieur à celui de la Bagasse.

Par ailleurs, cette espèce montre une hétérogénéité intra-placette de la croissance en hauteur sensiblement supérieure à celle observée chez la Bagasse. Ainsi, pour des placettes d'environ 1700 m², les valeurs sont comprises entre 33% et 50% (médiane : 40%), ce qui traduit sa plus grande sensibilité aux variations

édaphiques dans la limite de la surface des placettes : les placettes de Cordia montrent souvent d'importants écarts de hauteur (et d'état sanitaire) des arbres d'une zone à l'autre même à l'intérieur d'une placette.

Au stade de « petit plant » (20 cm de haut), le Cordia est sensible à l'hydromorphie temporaire : les plants se défeuillent, puis finissent par mourir. Toutefois, le Cordia semble l'être un peu moins que ne l'est la bagasse au même stade de développement. Ainsi, sur le site de Regina, 18% des Cordias ont dû être remplacés juste après plantation, contre 25% de Bagasses. Plus tard, quand les arbres ont des dimensions plus importantes (hauteur totale médiane > 7 m), au cours de période exceptionnellement arrosée de 2022, cette sensibilité s'est traduite par une défeuillaison plus ou moins importante, parfois totale. Cette réaction à trop d'eau s'accompagne d'une très forte diminution du taux de croissance en hauteur (2,2 m/an → 0,5 m/an), parfois même l'arrêt complet quand la défeuillaison est totale. Des parties de houppier peuvent même se dessécher et quelques arbres peuvent dépérir, voire mourir. Il s'agira dans les deux années à venir d'observer le comportement des arbres les plus affectés par ce traumatisme dû aux excès d'eau.

Ce n'est pas une espèce que nous avons observé croitre rapidement en grande saison sèche. A la différence de la Bagasse, le Cordia ralentit sa croissance en hauteur en période sèche, tandis que le houppier peut se défeuiller partiellement.

Comme pour la Bagasse, son association avec *S. guianensis* impacte significativement son développement la 1ère année. Mais cet obstacle est surmonté par la suite. Toutefois, compte tenu de sa plus grande sensibilité au milieu, certains individus peuvent croître en hauteur plus lentement. Ils sont alors rattrapés par le couvert herbacé de *S. guianensis* qui peut les recouvrir et les coucher. Par ailleurs, les Cordias forment des étages de branches dès le début de leur développement et à un niveau bas. Ces étages de branches constituent un très bon support à la progression en hauteur de *S. guianensis* (jusqu'à plus de 2 m !) qui recouvre d'autant plus rapidement les Cordias. En association avec *S. guianensis*, c'est une espèce qu'il faut surveiller pour dégager les arbres les plus lents. Néanmoins, nos essais ont montré que le Cordia tire profit de cette association avec *S. guianensis*, notamment sur le site de Regina, site sur lequel nous avons démontré que les arbres croissant avec *S. guianensis* capte de l'azote fixé par *S. guianensis*.

Son système ramifié très dense contribue efficacement à la fermeture rapide de la voute foliaire et à la constitution d'un sous-bois très sombre. Il contribue ainsi efficacement à la limitation du développement du recru, et à la disparition du couvert herbacé de *S. guianensis*. La forte hiérarchie tronc/branches est remarquable de telle sorte qu'aucune des 3 origines plantées ne présentent de problème de conformation, bien que nous ayons réalisé des tailles de formation. A Regina, quelques individus ont pu fleurir précocement après 3 ans de développement.

Certains individus peuvent se dessécher sans raison. Nous avons aussi observé une fonte de semis en pépinière chez cette espèce. Néanmoins, nous n'avons pas détecté de pathogène qui l'affecte significativement. L'attaque des fourmis Atta ralentit considérablement la croissance des arbres.

Quel est l'avenir de ces Cordias plantées sur les différents sites de Guyane ? Atteindront-ils des diamètres exploitables (> 30cm) ? Seront-ils nombreux à le faire ?

Nous n'avons qu'une vision très fragmentaire du comportement de cette espèce. Il faut savoir que cette espèce, native en Guyane, n'est pas inféodée à la zone littorale : elle y a été implantée par l'homme. Quelques tentatives peuvent être mentionnées :

- Quelques arbres plantés dans les années 1980 dans une zone à Balourou (*Phenakospermum guianensis* connu pour pousser dans les zones hydromorphes) de l'arboretum de l'Egyptienne. **Aucun individu n'a été retrouvé en 2016**.
- L'essai de Cordias de Tonnegrande mis en place en 1978 sur une parcelle (1,26 ha) défrichée au bulldozer. **En 2016, il ne subsiste aucun des 1400 plants** originaires du Surinam, en précisant que les plants étaient des « stumps » de 50 cm. Cette plantation de plein découvert a fait place à une forêt secondaire dans laquelle, *Humiria balsamifera*, une espèce forestière indicatrice de sols assez contraignants, est bien représentée.
- Sur le dispositif de Paracou, cette espèce à fait l'objet d'un premier essai d'introduction en 1978 en Guyane (plants prélevés au Surinam : origine « Bolivar », Venezuela) sur une parcelle défrichée manuellement. Vingt-sept arbres ont été plantés selon un espacement de 4m x 4m. En 1986, après une éclaircie en 1984, les 10 tiges restantes âgées de 8 ans sont bien développées et constituées, avec un diamètre moyen de 20 cm (~ 2,5 cm/an) et une hauteur moyenne de 14,3 m (~ 1,78 m/an). Ils ne présentent pas d'attaques apparentes. Les arbres semblent stagner (Fig. 111). Un second essai à Paracou a été réalisé sur un emplacement voisin défrichée en 1983 au Bulldozer D8 et planté en mai 1984. Les origines des plants sont « Antiocha » et Amaga (Colombie), ainsi que « Cartago » et « Turrialba » (Costa Rica). En 1985, les arbres de cet essai sont souvent chétifs, jaunissants avec des dessèchements en tête et des branches qui sèchent précocement. La croissance des plants est très réduite. Ce second essai réalisé sur un sol défriché mécaniquement est très négatif. En 2014, il ne reste aucun arbre de ces 2 essais. **Nous n'avons aucun détail concernant les circonstances de la mort de ces arbres.**
- L'essai de Cordias du jardin des Lauraceae à Fort Diamant sur la commune de Cayenne a montré des arbres avec des développements remarquables.

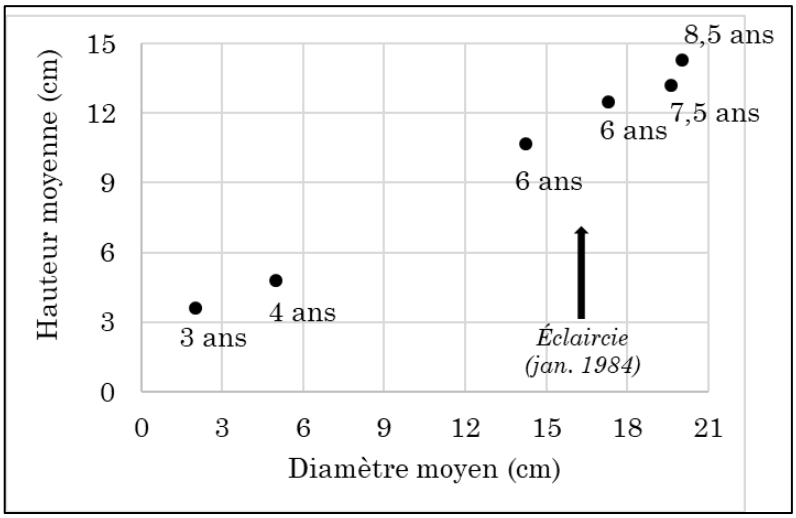


Fig. 111. Hauteur (m) et diamètre (cm) de quelques Cordia alliodora plantés en 1978 sur le 1er essai de Paracou. Les arbres sont âgés de 8,5 ans en 1986.

En forêt naturelle, les arbres observés les plus au Nord sont localisés sur le secteur de Montagne Tortue. Plus au Sud, c'est une espèce plutôt rare et rarement documentée. En milieu ouvert, elle abonde, comme à Saul (Guyane française) ou bien dans des abattis en pays Saramacca (Surinam ; *Comm pers.* Onofe Ngwete). Quelques arbres apparus spontanément dans les zones ouvertes du bourg de Saul ont fait l'objet de reconstitution de leur dynamique de croissance en hauteur et en épaisseur (Fig. 112 ; Nicolini & Morel 2016). Le taux annuel moyen de croissance en hauteur varie de 1 à 2,8 m/an chez des arbres âgés de 5 à 7 ans, et de 1,2 à 1,9 m/an chez des arbres âgés de 13 à 21 ans. Des taux assez comparables à ceux observés dans nos plantations.

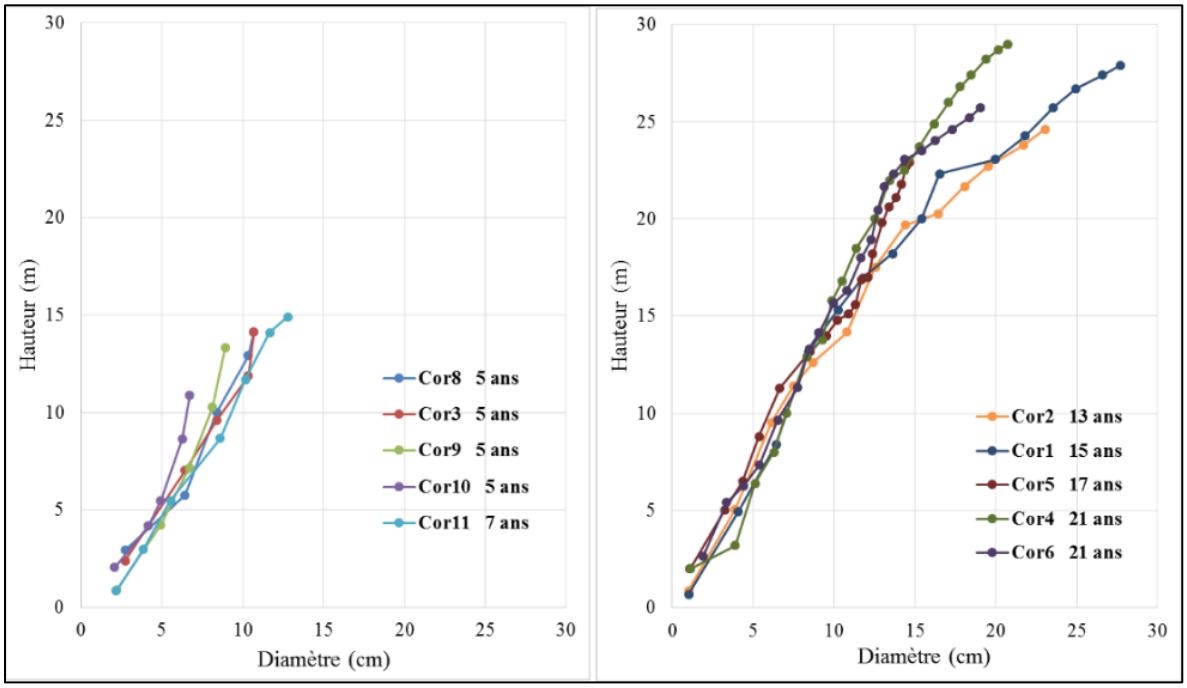


Fig. 112. Croissance en hauteur et en diamètre de l'axe principal d'arbres âgés de 5 à 7 ans (graphe de gauche) et de 13 à 21 ans (graphe de droite). Chaque point de chaque courbe marque la progression annuelle de la hauteur et du diamètre à 1m30.

La croissance des Cordias en plantation en Guyane est-elle remarquable ?

De nombreux sites de plantation existent en Equateur (plantations clonales) et en Amérique centrale (Costa Rica, Panama, etc). La figure 113 apporte des éléments de comparaison de la dynamique de croissance entre les Cordias en « plantation pure » dans notre dispositif de Guyane et des Cordias plantés dans différents contextes au Costa Rica et au Panama (Somarriba et al 2001).

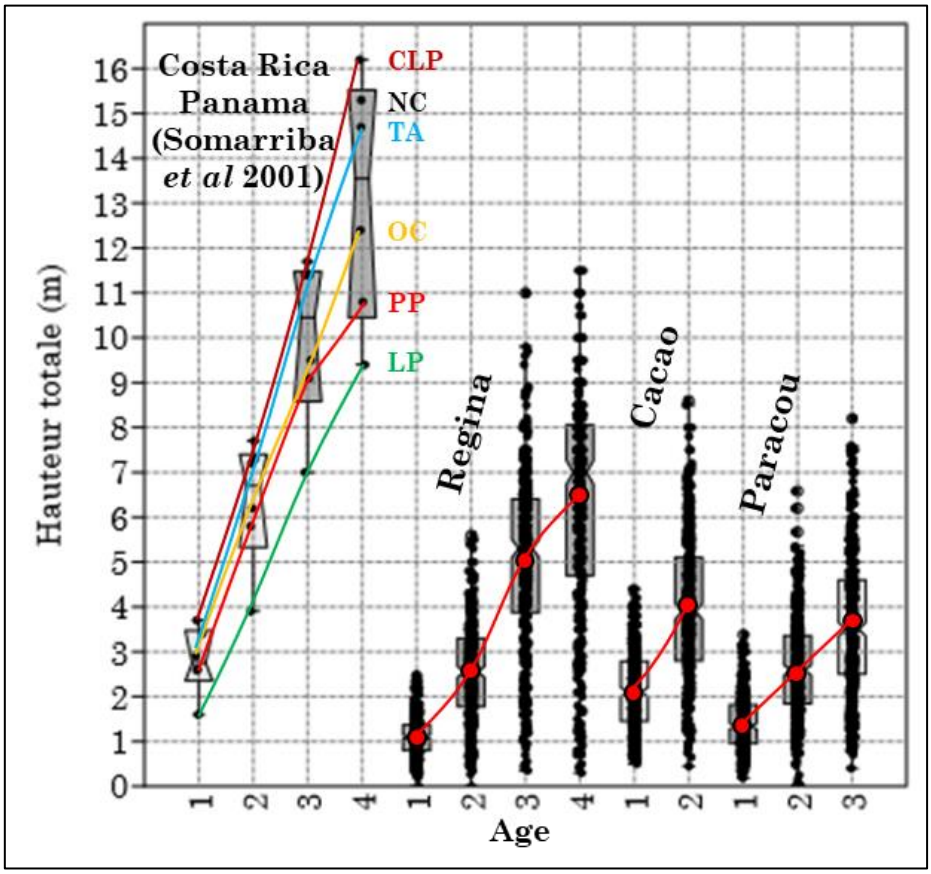


Fig. 113. Dynamiques de croissance en hauteur de Cordias (1) dans différents contextes (CLP « Cacao–Cordia–Plantain » ; NC « nouvelles plantations de cacao » ; TA « Taungya » ; OC « anciennes plantations de cacao » ; PP « plantation pure » ; LP « plantation en lignes ») en Amérique centrale (Costa Rica et Panama) et (2) en plantations pures sur les trois sites plantés en Guyane (Regina, Cacao et Paracou). Chaque point noir représente soit une valeur moyenne (Costa Rica, Panama ; Somarriba et al 2001), soit une valeur individuelle (Guyane ; Regina, Cacao et Paracou). Les lignes relient les valeurs moyennes.

Les Cordias en « plantation pure » (PP) en Guyane ont des dynamiques de croissance bien plus faibles que celle observée par Somarriba *et al* (2001). Dans leur étude de 2001, ces auteurs rapportent la croissance de Cordias dans différents contextes agricoles et forestiers. Le type de plantation est la variable la plus étroitement liée à la dynamique de croissance des Cordias. La dynamique la plus élevée a été observée dans le système « cacao–Cordia–banane plantain », avec ensuite et par ordre décroissant : taungya > nouvelles plantations de cacao > anciennes plantations de cacao > plantations en lignes > plantations pures (Fig. 113). Ces auteurs ont aussi observé qu'un mauvais drainage, des nappes

phréatiques élevées, des inondations ont un effet négatif sur la survie et la croissance des Cordias ; c'est en effet ce que nous avons observé chez les Cordias de Guyane pour ces 2 dernières années extrêmement pluvieuses, 2021 et 2022. La fertilité du sol (naturelle ou régulée) et les relations de base (Ca, Mg et K) affectent de manière significative la croissance du Cordia. Une teneur plus élevée en argile (qui affecte le drainage et la fertilité) a aussi un effet négatif sur la croissance. Somarriba *et al* (2001) concluent que d'une manière générale, le Cordia doit être planté dans des sols bien drainés, avec une nappe phréatique à plus de 100 cm de profondeur et en association avec des cultures gérées de manière intensive (lutte contre les mauvaises herbes et fertilisation) comme le cacao et les bananes plantains (Somarriba *et al* 2001).

Les itinéraires suivis en Guyane, (1) limités à un apport de fertilisant à la plantation, (2) en association ou non avec une fixatrice d'azote herbacé et (3) la réalisation d'entretiens espacés du recru peuvent être assez éloignés de ceux bien plus dynamiques appliqués dans les espaces agricoles d'Amérique Centrale. Par ailleurs, nous ne pouvons pas non plus exclure le contexte pédoclimatique particulier de la Guyane avec (1) une pluviométrie extrême en Guyane supérieure à 6000 mm à Regina, bien supérieure à la pluviométrie moyenne de 2500 mm rapportée par Somarriba *et al* (2001), et (2) des sols intrinsèquement très pauvres, retenant peu les ions et s'appauvrissant rapidement si des opérations régulières de gestion de la fertilité ne sont pas réalisées.

Il est très vraisemblable qu'en forêt guyanaise les arbres qui se développent dans les trouées forestières expriment des dynamiques similaires à celles observées par Somarriba et al (2001). Toutefois, ces arbres de forêt naturelle bénéficient d'un contexte forestier très favorable pour ce qui concerne le sol (sols forestiers : humus fertilisant, structure aérée, bon drainage, ressuyage rapide du sol). Ce sont des conditions très différentes que nous observons aujourd'hui dans nos plantations :

- Un sol qui ne reçoit plus d'apports consistants provenant de la voute forestière,
- Une rapide saturation en eau des sols sans ressuyage rapide en raison de l'absence d'une voute forestière à fort potentiel « évapotranspirant », et de fait, des sols souvent saturés en eaux en grande saison des pluies surtout ces derniers mois (2021-2022).

Quelle sera la dynamique de ces arbres dans les prochaines années ? La variabilité intra-placette, qui traduit déjà la sensibilité de certains arbres, ne laisse pas présager un futur développement dynamique d'un grand nombre d'individus. Les conclusions de Somarriba *et al* (2001) nous amène plutôt à reconsidérer la plantation de cette espèce par son intégration dans des itinéraires agricoles, en association avec d'autres végétaux pour lesquels des opérations régulières de gestion de la fertilité apports seront réalisées. Dans tous les cas, il est plus que nécessaire de poursuivre les suivis et les observations sur les quelques 1300 arbres plantés dans les parcelles FTC2 de Guyane : ils devraient fournir l'essentiel des

éléments pour se faire une meilleure idée de cette espèce et de sa culture en Guyane. Il serait aussi utile de planter des Cordias dans un contexte plus agricole, en association avec d'autres cultures : agrumes, Cacaoyers, Café.

Le Teck. Au terme de ce projet de plantation, il apparait que les 10 clones de Teck plantés sur les 3 sites ne semblent pas adaptés aux conditions pédoclimatiques des sites que nous avons plantées en Guyane. En effet, il faut se garder de conclure catégoriquement puisqu'il existe en Guyane de grands individus de cette espèce (site de l'ONF à Montabo) qui se portent très bien. Les éléments qui nous amènent à conclure ainsi sont les suivants :

- C'est l'espèce qui montre systématiquement la plus grande variabilité de croissance en hauteur intra-placette, signe d'une grande sensibilité aux variations des conditions de sol. Ainsi, les valeurs de coefficient de variations vont de 45% à 90% (moyenne 62% ; médiane 60%) et cette variabilité n'est pas d'origine clonale et s'exprime rapidement dès les 6 premiers mois après plantation.
- Après avoir développé des taux de croissance en hauteur remarquables (4 m/an) durant 2 années, la grande majorité des arbres a connu une phase d'arrêt de la croissance, puis une phase de déclin sur les 3 sites.

		Guyane					Malaisie
		Paracou	Cacao	Regina	Wayabo	Combi	Sabah
Granulo.	Argile	20	46	40	19	13-15	29-33-34
	Limons	5	11	8	5	11	**15-19-23**
	Sables fins	16	10	10	18	69	**32-40-49**
	Sables grossiers	59	36	42	58	7	**2-8-16**
Chimie	pH eau				5,3	4,9	
	pH KCL				4,7	4,1-4,2	
	MO			1-7%	4,5%	3,2%	
	CEC	3,6		4-12	4,8		**15,9**
	C/N	14	14	15	17	17	**4-9**
	Corg	1%	2,2%	2-6%		1,8-2,6%	0,6-0,8%
	N	0,08	0,08-2,5	0,25	0,15	0,1	0,22
	Al	0,7-1,4	0,08-2,5	0,2-1,5	0,1	1,3	**0,02**
	P total (g/kg)	<0,105			0,232	0,13	0,09-0,206
	Mn total (g/kg)		0,02	0,28	0,14	0,04	**4**
	Ca (me/100g)			0,2-1,7	2,8	0,4-0,9	1,7-9,8
	Mg (me/100g)				0,7	0,9-0,22	**1,08-7,1**
	K ech (meq/100g)				0,19	0,08	0,08-0,27
	Fe total (g/kg)		43-87	135	22	18	30-100

Tab. 8. Comparaison des valeurs de paramètres physico-chimiques entre des sols guyanais et des sols malaisiens. Les valeurs rapportées pour les sols des sites guyanais émanent de nos collectes, tandis que les valeurs rapportées pour les sols des sites malaisiens proviennent d'articles publiés par un partenaire du projet, O. Monteuuis (Goh et al 2012 ; Goh et al 2013).

Plusieurs questions peuvent être posées :

Est-ce le fait d'une pluviométrie très importante à laquelle, cette espèce n'est pas adaptée ? En effet, la Guyane connait actuellement des records de pluviométrie, très supérieurs à la pluviométrie de Malaisie (< 2500 mm) et à la pluviométrie préconisée pour ce type de matériel (2000 à 2500 mm/an).

Est-ce le fait des propriétés physico-chimiques des sols de Guyane, bien différentes de celles de Malaisie ? Le tableau 8 fournit des éléments de comparaison. La valeur du rapport C/N en Malaisie (4-9) révèle des sols avec une minéralisation de la matière organique rapide, très éloignée des valeurs observées en Guyane (14 à 17). La Capacité d'échange Cationique (CEC) relevée sur les sites malaisiens (15,9) est très supérieure à celles relevées sur les sites guyanais (3 à 5). Plus la CEC sera élevée, plus les cations seront susceptibles d'être retenus par le sol : la nature et la proportion d'argiles, l'état du complexe argilo-humique conditionnent cette CEC. Les faibles valeurs relevées en Guyane révèlent des sols peu « fixant », avec peu de réserves : des sols très pauvres chimiquement.

D'un point de vue granulométrique (mais aussi fonctionnel), le contraste entre les sols malaisiens (« limons sableux ») et les sols guyanais (« limons argilo-sableux » ; « argile sableuse ») est important : avec 15-23% de limons, les sols guyanais souffrent souvent d'hydromorphie temporaire (drainage vertical très ralenti), ce qui ne semble pas être le cas des sols observés sur les sites malaisiens. Les sables grossiers très abondants en Guyane le sont très peu dans les sol malaisiens cités.

Fig. 114. Aspect d'un système racinaire de Teck clonal.

Est-ce le non apport d'engrais au cours du développement qui compromet le développement des tecks ? En effet, nous avons pu observer que l'absence d'apport de fertilisants à la plantation sur le site de Cacao (Ferralsols) condamne rapidement les plants à la stagnation de la croissance en hauteur dès la plantation. Finalement, l'apport d'engrais de fond à la plantation ne ferait que retarder l'échéance d'une faim nutritionnelle. Cette hypothèse va aussi dans le sens de l'hypothèse précédente : les propriétés physico-chimiques des sols de Guyane révèlent des sols très pauvres, peu dynamiques en comparaison de ceux des sites qui ont hébergé les plantations des mêmes clones en Malaisie. Le puissant système racinaire traçant de ces clones

de tecks (Fig. 114) mis en place dès la plantation révèle peut-être un végétal très exigeant de ce point de vue.

Néanmoins, nos essais ont montré que l'association avec *S. guianensis* n'était pas défavorable sur Régina et Paracou. En effet, les taux de croissance en hauteur élevés exprimés par ces clones dès la plantation leur permettent de ne pas se faire recouvrir par *S. guianensis*. Par ailleurs, comme pour la Bagasse, le Teck tire profit de cette association avec *S. guianensis*, notamment sur le site de Regina, site sur lequel nous avons démontré que les arbres croissant avec *S. guianensis* captent de l'azote fixé par *S. guianensis*. Dans des sols intrinsèquement pauvres en azote, le fait qu'il puissent disposer de cet azote fixé est un point positif de l'association.

Nous avons aussi observé les remarquables capacités de résistance du Teck. En effet, très peu de tecks sont morts durant la durée de notre projet. Même si les individus végètent, ils ne meurent pas et continuent de développer leur système racinaire. C'est aussi la raison pour laquelle, nous observons tant de variabilité de croissance chez les tecks : ils sont quasiment tous là pour témoigner de leur parcours respectif. En cela, le Teck s'oppose à la Bagasse dont les jeunes plants disparaissent rapidement quand ils sont très stressés.

Quelles perspectives pour le Teck en Guyane ? La recherche d'autres clones plus adaptés est une option envisagée. En Guyane, une parcelle de 3 hectares accueillant 67 clones de Malaisie a été installée en 2020 dans le cadre du projet FEADER GUYATECK ; O. Monteuuis, CIRAD). Mais la recherche d'autres conditions pédoclimatiques plus favorables en Guyane devrait aussi rester une option envisageable. En effet, il existe des tecks qui se développent correctement en Guyane : il s'agira, dans une future étude, de déterminer quelles sont-elles.

Les 3 à 5 années d'observation grandement perturbées par une pluviométrie inhabituelle (2021-2022) ne permettent pas de conclure quant à l'avenir du teck pour des plantations lucratives de bois d'œuvre en Guyane actuellement. D'autres essais sont nécessaires sans sous-estimer l'influence perturbatrice de l'hétérogénéité des sols bien souvent inadaptés et les préjudices qui peuvent être causés par les fourmis Atta dans certains secteurs comme Paracou.

Le Niangon est l'espèce qui suscite la plus grande interrogation. En effet, c'est l'espèce qui a montré les meilleurs résultats en plantation lors d'inventaires réalisés en 2015 (Nicolini & Morel 2016). Pourtant, c'est elle qui montre les résultats les plus contradictoires dans notre dispositif FTC2 :

- Une dynamique de croissance remarquable faisant suite à une mortalité dramatique induite par une conjoncture défavorable (forte pluies + couvre sol + compaction de surface) sur le site de Regina.
- Une mortalité importante sur le site de Paracou révélant la vulnérabilité de cette espèce face aux attaques importantes de fourmis Atta, mais aussi à

l'envahissement par le recru adventif ou bien le couvert herbacé semé de *S. guianensis*.

- Un très bon taux de survie suivi par une dynamique de croissance qui va *crescendo* sur le site de Cacao.

Les observations régulières sur les 3 sites nous permettent maintenant de dresser un portrait plus précis du comportement en Guyane de cette espèce forestière africaine plantée depuis les années 1930 en Afrique, emblématique du commerce du bois et finalement assez peu documentée pour ce qui concerne son développement. En premier lieu, cette espèce montre une variabilité de croissance en hauteur intra-placette très similaires à celle du Cordia, avec des valeurs de coefficient de variations allant de 13% à 55% (médiane 39%).

C'est l'espèce qui a **les plus bas taux de croissance en hauteur au début de son développement (Fig. 115)** : quand Bagasses, Tecks, Cordias et Ingas sont capables de croître de plus de 2 m/an dès la première année, **les Niangons ne croissent que d'environ 1 m/an**. C'est un aspect défavorable en plantations car c'est l'espèce qui, à la plantation, subit le plus la cohabitation avec soit le recru adventif quand celui-ci a un développement dynamique, soit avec *S. guianensis* utilisé en couvre sol. **C'est donc l'espèce qui demande le plus d'attention et d'entretien (dégagements réguliers autour des arbres) durant les 2 premières années**, aspect qui constitue un handicap pour les plantations industrielles.

En revanche, **c'est l'espèce qui développe ultérieurement les taux de croissance en hauteur les plus importants au moins sur les sites de Cacao (1,7 m/an) et Regina (3 m/an), largement supérieurs à 2 m/an (Fig. 115). A Regina, c'est aussi l'espèce qui a exprimé les plus forts accroissements diamétriques moyens (Fig. 53) et qui a le mieux résisté à la très forte pluviométrie de ces 3 dernières années.**

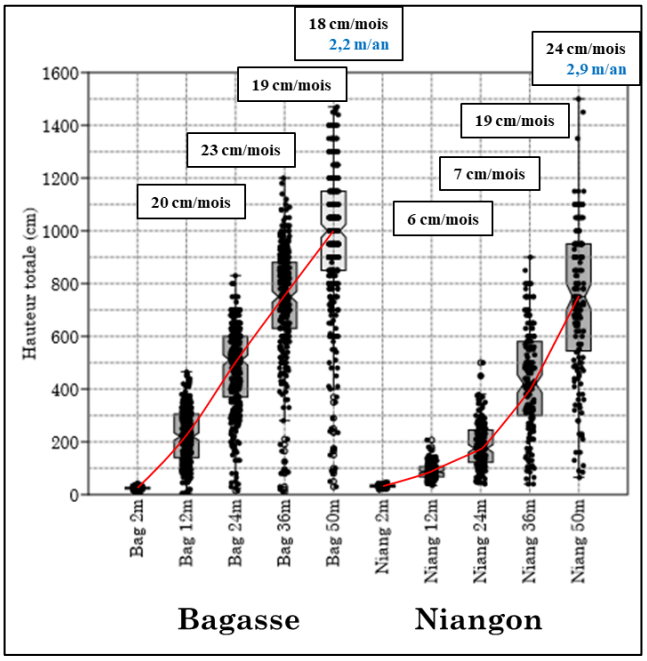


Fig. 115. Dynamique de croissance en hauteur de la Bagasse et du Niangon sur des placettes avec couvre-sol de S. guianensis sur le site de Regina. Les courbes relient les valeurs médianes.

Le Niangon exprime une phase d'installation plus lente que celle des autres espèces et de la Bagasse notamment (Fig. 115). Cette phase d'installation plus lente est typique des espèces hémi-tolérantes. Ce tempérament est aussi révélé par la capacité de sa régénération

naturelle à se développer dans l'ombre de la voute dominante, ce que nous avons pu vérifier dans les 2 sites plantés en Guyane, l'arboretum de Egyptienne et le dispositif « plantation » de Paracou. Chez ces espèces hémitolérantes, le taux de croissance en hauteur en plantation, bas à moyen dans les premiers temps du développement, va *crescendo* à mesure que les arbres progressent en hauteur et gagnent en structures foliaires, en ramification, et bien entendu en biomasse racinaire. C'est ainsi que plusieurs espèces hémitolérantes plantées « rattrapent » finalement les espèces plus héliophiles en exprimant un peu plus tardivement des taux de croissance équivalents. Ainsi, sur « l'essai d'essences locales » de Paracou planté en plein découvert en 1984 et dont la hauteur des arbres a été mesurée 29 ans après la plantation (Nicolini & Morel 2015), 2 espèces hémitolérantes (Angélique *Dicorynia guianensis*, Gonfolo rose *Qualea rosea*) montre des taux de croissance en hauteur moyens (H_{totale}/age ; 0,7 à 0,8 m/an) similaires, voire parfois bien supérieurs à ceux (0,5 à 0,8 m/an) d'espèces héliophiles (Simarouba *Simarouba amara*, Yayamadou *Virola michelii*, Goupi *Goupia glabra*). La figure 115 compare la dynamique de croissance sur le site de Regina d'une héliophile stricte, la Bagasse, et d'une hémitolérante, le Niangon : elle montre bien les dynamiques différentes et le remarquable « rattrapage » de croissance en hauteur des Niangons.

<u>Comment expliquer la forte mortalité observée à Regina ?</u>

C'est très vraisemblablement cette phase d'installation spécifiquement plus lente combinée à la conjoncture d'autres facteurs qui pourrait expliquer la mortalité dramatique à Regina. Nous pouvons maintenant considérer que la compaction de surface (opérations mécaniques), qui a quasiment neutralisé les capacités d'absorption de l'eau du sol (20 mm/h <<< 1000 mm/h), et la très forte pluviométrie du premier semestre 2018 (Fig. 116) ont généré des conditions hydromorphes temporaires qui ont limité le développement des racines profondes (Fig. 9) ; mais sans toutefois affecter l'état sanitaire général des arbres, qui était très bon en pleine saison des pluies, ni provoquer la mortalité des plants (Fig. 3) ! Parvenus jusqu'à la grande saison sèche (octobre-novembre 2018), sur un sol de surface (0-30 cm) riche en pisolithes (moins de réserve en eau des couches de surface) et en concurrence avec un fort couvert herbacé de *S. guianensis*, un grand nombre d'arbres se sont rapidement défeuillés, puis se sont desséchés, ne survivant pas fort stress hydrique (63% de mortalité). Cette situation dramatique observée à Regina est à comparer avec celle très encourageante, observée sur le site de Cacao : une plantation pourtant tardive (mai 2019), une absence de compaction de surface permettant une dynamique correcte d'absorption de l'eau par le sol (860 à 1580 mm/h), une pluviométrie modérée à la plantation (Fig. 116) n'ont pas généré une mortalité élevée dans la population de Niangons, même en présence de *S. guianensis* : seulement 8 % de mortalité sur le site de Cacao !

Aussi, nous formulons l'hypothèse qu'à Regina, l'absence de compaction de surface, ou bien l'absence de couvert herbacé de *S. guianensis* aurait préservé les Niangons d'une mortalité dramatique : si la forte pluviométrie est un élément imprévisible,

la compaction de surface aurait pu être évitée par la mise en œuvre des opérations mécaniques hors saison des pluies, et par le retrait (non installation, fauchage) du couvre-sol de *S. guianensis*, 2 leviers sur lesquels nous pouvions agir.

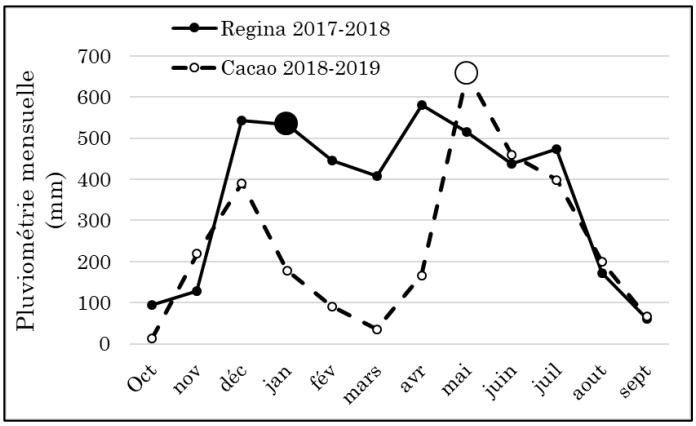


Fig. 116. Pluviométrie mensuelle à Regina et à Cacao. Les mois répertoriés vont de d'octobre de l'année n à septembre de l'année n+1 sur la période 2017-2018 à Regina et 2018-2019 à Cacao. Les gros points indiquent le mois de plantation. Noter l'absence du « petit été de mars » à Regina en 2018 et sa présence remarquable à Cacao.

La comparaison entre Regina et Cacao montre aussi que **la cohabitation avec *S. guianensis* dès la plantation n'est pas rédhibitoire**. En effet, bien que les Niangons du site de Cacao aient été plantés en mai, ce qui est plutôt tardif (1) au cours d'une année résolument plus sèche (2), et qu'ils aient clairement subi la cohabitation avec *S. guianensis* sur la placette semée (3), ils ont survécu (91 %) et ont fini par s'en affranchir, exprimant maintenant des taux de croissance remarquables (1,7 m/an). Sur la base des connaissances acquises sur les aspects racinaires et l'importance des racines profondes dans un contexte pédoclimatique avec saison sèche, la croissance accrue sur la parcelle de Regina (0,6 m/an → 3 m/an) est le signe d'un enracinement qui n'a pas été dramatiquement contraint chez les arbres survivants et qui est maintenant plus profond, permettant aux arbres d'accéder à une réserve en eau plus importante, mais aussi à de l'azote fixé par *S. guianensis*.

Finalement, cette mortalité dramatique observée à Regina, qui au premier abord laissait penser à une inadaptation de l'espèce aux conditions locales, suggère maintenant plutôt une mauvaise connaissance de cette espèce et la mise en œuvre <u>d'un itinéraire inadapté</u> de plantation dans des conditions aussi extrêmes que celles ayant cours à Regina.

<u>Pouvons-nous envisager un avenir intéressant pour ces nouveaux Niangons plantés en Guyane ?</u>

Il faut savoir que le Niangon est une des rares espèces plantées dans les années 1980 qui ont montré les meilleurs résultats de croissance et de productivité (Nicolini & Morel 2015). Toutefois, un des 2 sites, celui de Paracou, présentait des résultats bien moins bons que ceux observés sur le site de l'arboretum de l'Egyptienne. Des analyses réalisées sur ces 2 anciennes parcelles plantées en 1985-1986 ont révélé différentes situations édaphiques présentées dans le chapitre 4. Un diagnostic et une analyse granulométrique en laboratoire ont révélé que les

sols de Paracou renfermaient plus de limons en profondeur (90 cm ; Fig. 117), et étaient bien moins drainants que les sols de l'arboretum de l'Egyptienne.

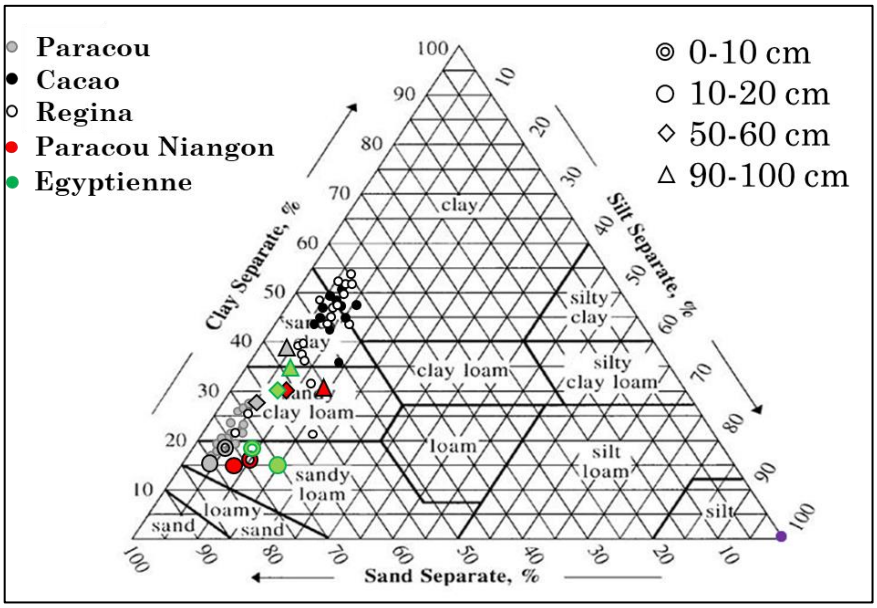


Fig. 117. Triangle des textures comparant la composition granulométrique des sols à différentes profondeurs de différents sites sur lesquels des Niangons ont été plantées : 1985-1986 (arboretum de l'Egyptienne et dispositif de Paracou) et 2018-2019 (Regina, Paracou et Cacao).

Par ailleurs, le profil de sol de la parcelle de Niangon de Paracou contient bien plus de quantités de sables grossiers que celui de la parcelle de l'arboretum de l'Egyptienne. En plus d'être un sol à drainage latéral superficiel qui compromet le développement profond des racines, la présence de plus grandes quantités de sables grossiers (44 à 63 % ; Fig. 118), mais aussi d'éléments grossiers, ampute de manière conséquente le sol de Paracou de ses réserves en eau. Il faut savoir que plus de 40% d'éléments grossiers conduit à d'importantes contraintes pour les aspects eau, mais aussi pour l'aspect enracinement. Sans surprise, c'est sur le site de Paracou que les Niangons dépérissaient le plus, puis mourraient alors qu'aucun Niangon dépérissant n'a été observé sur l'arboretum de L'Egyptienne.

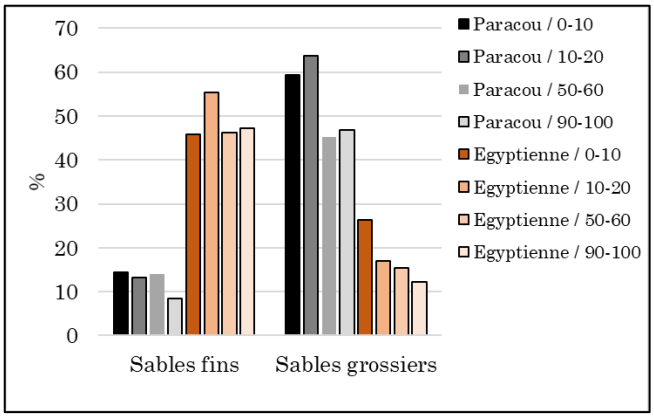


Fig. 118. Proportions de sables fins et de sables grossiers à différentes profondeurs sur les parcelles de Niangons plantées en 1985 sur les sites de Paracou et de l'arboretum de l'Egyptienne.

Finalement, les Niangons se comportent très biens sur des sols sablo-argileux (arboretum de l'Egyptienne), comme sur des Ferralsols plus argileux (Régina, Cacao), pourvu que (1) les sols soient à drainage vertical libre et (2) ne renferment pas trop de sables grossiers. Au stade actuel des observations sur le site de Regina, il est très vraisemblable que les plus beaux

arbres seront produits en sommet de relief (placette Niang 5), tandis que les quelques arbres restant de la placette Niang 12 située en bas de pente seront des arbres plus petits, de statures similaires à celles des Niangons de l'ancienne parcelle de Paracou eu égard à la variabilité importante des sols avec la pente sur ce site !

A Regina comme à Cacao, les pluviométries très fortes des années 2021-2022 ne semblent pas affecter cette espèce qui affiche toujours un excellent état sanitaire, ce qui n'est pas le cas des 3 autres espèces (Cordias, Bagasses et Tecks). Le Niangon ne semble pas craindre non plus les années un peu sèches si son système racinaire a pu se développer en profondeur comme nous l'observons à Cacao. **Malgré les déconvenues essentiellement dues à notre méconnaissance du développement de cette espèce dans le jeune âge et des itinéraires les plus appropriés à mettre en œuvre, c'est une espèce exceptionnelle qu'il faut retenir même si elle est exotique et plus délicate à conduire au démarrage.**

Autres limitations : (1) la difficulté à obtenir des graines et (2) la vulnérabilité des individus aux attaques de fourmis Atta dans le jeune âge. A noter (3) que cette espèce intéresse aussi un longicorne appartenant probablement au genre *Oncideres*. En précisant aussi que l'Angélique de Guyane est aussi très ciblée par un insecte appartenant au même genre, mais que cela ne met pas pour autant l'Angélique en situation de danger en Guyane !

Il nous parait indispensable dans un futur proche (1) de poursuivre le suivi du développement des nouveaux arbres plantés et (2) d'inclure cette espèce dans de nouvelles expérimentations visant à maitriser les premières phases de son développement en plantation, notamment en association avec la légumineuse couvre-sol *S. guianensis*.

Le Pois sucré est une espèce ligneuse de service qui s'est plutôt très bien comportée sur 2 des 3 parcelles, Paracou et Cacao. Sur ces 2 parcelles, c'est l'espèce qui présente les plus bas coefficients de variation, compris entre 10 et 33% (médiane 25%), un signe que cette espèce est plutôt à l'aise sur les sols guyanais, qu'ils soient des Acrisols ou des Ferralsols, dès lors qu'un apport de fertilisant est réalisé à la plantation et permet une installation optimale des individus.

En revanche, la plantation de cette espèce à Regina a été un échec complet. Sur cette parcelle, c'est aussi la seule espèce qui n'a pas été fertilisée à la plantation. Dès lors, cette espèce est confrontée de manière aigue aux écueils naturels de cette parcelle : (1) une grande quantité de pisolithes vers 30 cm de profondeur qui induisent une moindre réserve en eau des couches de sols de surface en grande saison sèche et qui peuvent aussi constituer autant d'obstacles à la progression des racines, et (2) une très faible disponibilité du phosphore dans ces Ferralsols (voir chapitre 4). Cet « inconfort » aigu subi par les plants sur les sols de Regina est

rendu par un coefficient de variation de la hauteur très important chez les plants survivants (35% < CV médian de 55% < 80%). Ces valeurs hautes traduisent la très grande variabilité des réponses exprimées par les plants face au grand nombre de conditions locales de sol rencontrées.

Notre hypothèse est la suivante : c'est (1) une très faible disponibilité du phosphore P et du potassium K dans les couches de sol de surface de la parcelle de Regina concomitante à (2) une très forte pluviométrie durant les 6 mois suivant la plantation qui a pu directement compromettre le développement des Ingas plantés (3) sans fertilisation de fond.

le phosphore peut s'avérer être un facteur limitant majeur au stade juvénile (graine, jeune plant). Les plantes absorbent le P et le K sous forme d'ions dans la solution du sol généralement très faiblement concentrée en P et en K, les quantités de P et de K du sol étant très majoritairement adsorbés ou liés à une phase minérale solide : dans le cas du phosphore, les constituants du sol responsables de la libération et de la dynamique du P dans les sols sont principalement les oxy-hydroxydes de fer et d'aluminium et les constituants calcaires. Dans le cas du potassium, ce sont les argiles et les matières organiques.

Lorsque la plante prélève du P et du K dans la solution du sol, elle contribue à créer des gradients de concentration qui induisent une libération de ces 2 éléments, adsorbés ou liés à la phase minérale solide, et qui diffusent et réapprovisionnent la solution du sol. Le processus de diffusion est plus lent et se produit sur une plus courte distance, en particulier pour le phosphore. La quantité de phosphore ou de potassium mis à disposition dépend donc de la concentration dans la solution, de la quantité susceptible de se libérer rapidement, mais elle est indépendante de la quantité totale du sol.

***En revanche, elle dépend aussi de la capacité des racines à explorer le volume du sol et à stimuler la différence de concentration dans la solution du sol. Ainsi, un mauvais développement racinaire** à la suite de tassements, d'hydromorphie peut provoquer **des carences en phosphore**, au travers de la difficulté de mise à disposition du phosphore à des stades clés de carences pour les plantes.*

*Le risque de carences peut être levé par l'apport d'engrais, d'origine minérale ou organique, et **l'apport doit être fait aux stades juvéniles, pour soutenir le développement racinaire et donc soutenir la capacité des plantes à mobiliser le phosphore total du sol** (au semis ou juste après) de manière à acquérir par la suite une autonomie durable sur cette ressource, même dans des conditions de sol à très faible disponibilité.*

Source : Fertisols.fr ; unifa (fertilisation-edu.fr).

Une fois en terre, le jeune plant d'Inga doit rapidement trouver du P (et du K) dans le sol à proximité de ses racines puisque cet élément est peu mobile. Il puise dans ses réserves pour poursuivre le développement racinaire commencer en pot et explorer le sol en quête des éléments disponibles. C'est aussi à ce moment qu'il doit amorcer le processus de prélèvement-libération-diffusion des éléments P et K, processus qui ne devrait plus être interrompu au cours du développement de l'arbre, même dans des situations de très faible disponibilité. Si des conditions environnementales défavorables ont cours (pour exemple, une pluviométrie

excessive et durable : 3500 mm en 6 mois à Regina au 1er semestre 2018), le développement racinaire peut ne pas être suffisant, d'autant plus si les plants ont un état sanitaire suboptimal. Le plant sans moyen de capter les nutriments, entre alors dans une phase de carence durable. Sans développement caulinaire notable et surtout sans formation de racines profondes permettant à la plante d'atteindre une profondeur de sécurité hydrique (> 80 cm de profondeur en Guyane), la plante enracinée superficiellement (< 50 cm de profondeur), et qui végète sans solution durant plusieurs mois, entrera alors dans une période de stress hydrique intense durant la période sèche. Cette situation est très vraisemblablement aggravée par la présence importante des pisolithes qui réduisent les capacités de stockage de l'eau des couches de sol de surface. Sans apport de fertilisant, la situation n'a aucune raison de s'améliorer avec le temps, les plants ne parviennent pas à s'installer et les effectifs ne cessent de baisser continument comme cela est le cas sur la parcelle de Regina.

A la plantation des plants juvéniles, le risque de carences initial peut être levé par l'apport d'engrais, d'origine minérale ou organique, qui pourvoit aux premiers besoins de la plante. La part de phosphore apportée au semis ou bien au jeune plant favorise la vigueur au démarrage en stimulant notamment la croissance du système racinaire qui va (1) plus rapidement explorer les couches de sol de surface. A partir de là, (2) le plant est capable d'amorcer durablement le processus de prélèvement-libération-diffusion des éléments P et K, ce qui lui permet de devenir autonome en matière d'accès aux différentes ressources, **et il n'est plus besoin de fertiliser par la suite**. Enfin, le plant forme aussi (3) des racines plus profondes qui placent le plant à l'abri du stress hydrique intense (approvisionnement en eau).

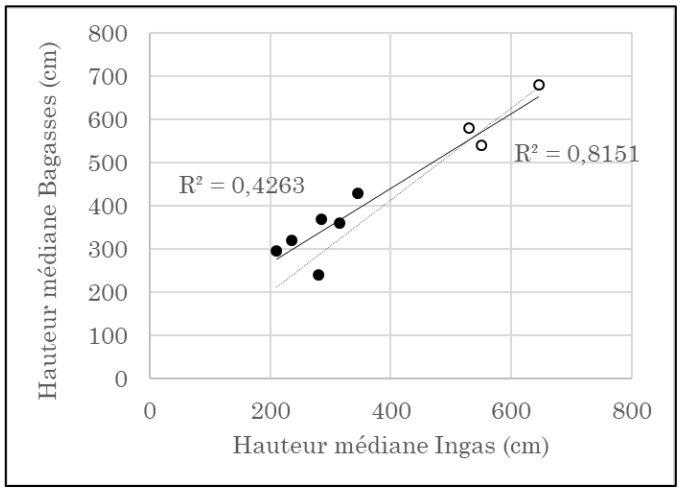


Fig. 119. Relation positive entre la hauteur médiane des Ingas et celle des Bagasses dans les placettes mixtes des sites de Paracou à 23 mois (point noir) et de Cacao à 39 mois (point blanc). Chaque point représente une placette.

Dès lors que les plants ont été fertilisés à la plantation, comme cela est le cas sur les parcelles de Cacao et Paracou, ils connaissent un développement optimal qui est le reflet des conditions locales de fertilité des sols, comme chez d'autres espèces telles que la Bagasse (Fig. 119) : les meilleurs emplacements produisent des arbres plus grands que ce soient pour les Ingas comme pour les Bagasses dans les placettes mixtes. Toutefois, à la différence des Bagasses, le pois sucré est un arbre qui semble mieux tolérer les conditions très humides, les périodes de sol très engorgés comme nous l'avons observé à Cacao,

dès lors que les sols restent drainant. Ainsi, les très fortes pluviométries de 2021 et 2022 n'ont pas semblé affecter les Ingas plantés sur le site de Cacao : leur état sanitaire est resté très bon alors que les Bagasses, les Cordias et les Tecks ont souffert de cette période très humide.

La plantation d'Ingas en mélange avec des Bagasses a-t-elle eu une influence sur la croissance des Bagasses ?

Les Ingas sont attendus pour différents services qui sont notamment la fixation d'azote, mais aussi sa croissance rapide et son architecture évasée qui peut faire office de bourrage pour contraindre les arbres forestiers associés à développer une architecture sans défaut.

Il est encore trop tôt pour répondre à la contribution azotée des Ingas dans les placettes mixtes. En revanche, les Ingas produisent rapidement des houppiers très denses et étalés qui recouvrent une grande partie des placettes où ils sont plantés. Ils peuvent même parfois supplanter les Bagasses associés. Il faut alors intervenir pour laisser la place aux Bagasses comme cela a été nécessaire sur le site de Cacao et de Paracou.

Sur ce même site de Cacao, nous avons aussi observé que dans les placettes mixtes, les Ingas pourraient constituer des compétiteurs pour la ressource en eau. En effet, nonobstant l'influence de l'altitude de la placette sur la croissance (voir Fig. 98 ; les bagasses en bas de pente poussent significativement plus en hauteur que les Bagasses plantés plus haut sur la pente), les Bagasses associées avec des Ingas ont tendance à exprimer de moindres taux de croissance que les Bagasses en peuplement pure durant les années à pluviométrie modérée (Fig. 98). En revanche, durant les années à pluviométrie élevée, nous observons une baisse généralisée des taux de croissance des Bagasses et il ne semble plus exister de différences significatives entre ensembles mixtes et ensembles pures. Ces observations restent toutefois très préliminaires et très localisées. Elles devront à nouveau être vérifiées sur la parcelle de Cacao, mais aussi sur la parcelle de Paracou.