

Protocole expérimental : Vincent Freycon<sup>1</sup>, E. Nicolini<sup>1</sup>

**Prises de données sur le terrain** : V. Freycon<sup>1</sup>, Xavier Guerrini<sup>1</sup>, Alexandre de Haldat<sup>1</sup>, Alex Fédélique<sup>2</sup> et Eric Nicolini<sup>1</sup>.

**Analyses en laboratoire** : V. Freycon<sup>1</sup>, Xavier Guerrini<sup>1</sup>, Eric Nicolini<sup>1</sup>, Gaël Sénécal<sup>1</sup> et Marie Tella<sup>1</sup>.

**Rédaction du rapport final** : Eric Nicolini<sup>1</sup> et Vincent Freycon<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> CIRAD, <sup>2</sup> UM2

La première partie de ce rapport a fait l'objet d'une première publication en 2021 des résultats obtenus sur le site de Regina.

**Guerrini X., Freycon V., de Haldat du Lys A., Nicolini E., 2021.** Dynamique contrastée de la compaction d'un Ferralsol après une défriche mécanisée alternative en Guyane française. Bois et Forêts des Tropiques – Volume 348 – 2e trimestre – juin 2021 – p. 65-78. *Contexte.* Le changement d'usage d'une forêt naturelle en plantation forestière s'accompagne d'une compaction du sol, d'une augmentation de la résistance mécanique à la croissance des racines (Kozlowski 1999), d'une baisse de la porosité et de la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol et de l'apparition de conditions hydromorphes de l'horizon de surface (Woodward 1996). La compaction sera d'autant plus forte que l'exploitation aura été mécanisée et réalisée en saison des pluies (Schack-Kirchner et al 2007). Les objectifs de cette étude sont d'évaluer l'impact de la défriche et des différents scénarii sylvicoles sur les services rendus par les sols, en particulier ceux de support (maintien de la qualité des sols) et de régulation (régulation du climat : séquestration du C et émissions de NOx) à l'aide d'un panel d'indicateurs intégrant propriétés physiques, chimiques et biologiques clefs du sol. L'évolution des sols sera appréhendée au travers de 2 approches complémentaires.

# **Objectifs**

- Suivre l'évolution de la qualité des sols après défriche et après plantation
   1. Approche physico-chimique
  - 2. Approche biologique (bio indicateurs)
- 2. Evaluer l'impact des plantes de services sur la qualité des sols.
- 3. Elaborer un outil simple de suivi de la structure et la fertilité des sols.

# Description détaillée.

L'Approche biologique (JC Roggy INRA). Les processus microbiens du C et du N du sol sont les bio-indicateurs pertinents des fonctions écologiques liées aux services de support et de régulation rendus par les sols (Mausbach et Tugel 1997; Dominati et al. 2010; Dominati et al. 2014). Dans les deux cas, les processus impliqués sont, pour le carbone, la respiration du sol et, pour l'azote, les processus de nitrification et de dénitrification (Schimann et al, 2012); ces processus étant assurés uniquement par des fonctions biologiques. En effet, le cycle du carbone est essentiellement basé sur le travail microbien de décomposition de la matière organique, et le cycle de l'azote sur la spécificité des bactéries à chaque étape des réactions chimiques (nitrification : production de N minéral, dénitrification : émission de gaz à effet de serre N<sub>2</sub>O). Cette approche suivra la chronologie générale : Etat initial T0(peuplement arboré préexistant), (ii) après exploitation/déforestation T1 et (iii) après mise en place des plantations T2. L'ensemble de ces mesures permettra de d'évaluer l'impact des différentes opérations et actions menées dans ce programme. Les résultats de cette approche sont encore en cours d'analyse et ne seront pas abordés dans ce chapitre.

L'Approche physico-chimique (V. Freycon CIRAD) suivra l'évolution de la compaction du sol et des caractéristiques associées (densité apparente, taches, vitesse d'infiltration, etc) (i) à l'état initial T0 (peuplement arboré préexistant), (ii) après exploitation/déforestation T1 et (iii) après mise en place des plantations T2. Le diagnostic des sols des plantations à T0 s'appuiera sur une étude de la variabilité spatiale des sols en fonction de la topographie réalisée au travers de la description de profils de sols représentatifs de la zone d'étude. A cela, sera associée une étude spécifique des horizons de surface (texture, teneur en carbone, taches, densité apparente et vitesse d'infiltration de l'eau) qui sera aussi réalisée après défrichement (T1) afin d'évaluer la perte de qualité du sol à cause du défrichement, et après plantations (T2) de manière à relever et chiffrer une amélioration par rapport T1. Cette approche suivra la chronologie générale : Etat initial T0 (peuplement arboré préexistant), (ii) après exploitation/déforestation T1 et (iii) après mise en place des plantations T2. L'ensemble de ces mesures permettra de d'évaluer l'impact des différentes opérations et actions menées dans ce programme.

-	Plan	4
-	1 - Introduction.	6
-	2 - Situation topographique et suivi des sols sur les 3 parcelles.	9
	<ul> <li>Le site de Regina-Toulouri</li> </ul>	9
	<ul> <li>Situation topographique.</li> </ul>	9
	<ul> <li>Protocole d'étude des propriétés physicochimiques des sols</li> </ul>	9
	<ul> <li>Résultats</li> </ul>	11
	• Evolution de la surface de la parcelle	11
	• Description du profil de sol.	12
	Caractéristiques chimiques.	14
	Granulométrie.	15
	Litière du sol.	16
	• Densité apparente .	17
	• Vitesse d'infiltration de l'eau.	18
	• Terre fine et éléments grossiers.	20
	<ul> <li>Discussion.</li> </ul>	20
	• Compaction maximale en surface juste après la d	léfriche.
		20
	• Epaisseur impactée par la compaction juste après la d	léfriche.
		21
	Plus d'un an après défriche,	21
	Densité apparente du sol et impact potentiel sur la cro	oissance
	racinaire.	24
	<ul> <li>Le site de Paracou</li> </ul>	28
	<ul> <li>Situation topographique.</li> </ul>	28
	<ul> <li>Protocole d'étude des propriétés physicochimiques des sols.</li> </ul>	28
	Résultats	29
	• Evolution de la surface de la parcelle.	29

	Pédologie.	29
	Description synthétique du profil de sol.	30
	Caractéristiques chimiques.	32
	Granulométrie.	33
	• Densité apparente (da).	34
	• Vitesse d'infiltration de l'eau.	35
	<ul> <li>Discussion.</li> </ul>	36
	• Absence de compaction en surface juste après la c	léfriche.
		36
	• Densité apparente et impact potentiel sur la cre	oissance
	racinaire.	36
	• Un sol avec beaucoup de sables grossiers.	37
0	Le site de Cacao.	38
	<ul> <li>Situation topographique.</li> </ul>	38
	<ul> <li>Protocole d'étude des propriétés physicochimiques des sols.</li> </ul>	38
	Résultats	39
	• Evolution de la surface de la parcelle.	39
	Description synthétique du profil de sol.	39
	Caractéristiques chimiques.	41
	Granulométrie.	41
	• Densité apparente (da).	42
	• Vitesse d'infiltration de l'eau.	44
	<ul> <li>Discussion</li> </ul>	45
	• Compaction en surface juste après la défriche.	45
	• Vitesses d'infiltration de l'eau.	45
	• Densité apparente du sol et impact potentiel sur la cro	oissance
	racinaire.	45
0	Descriptions supplémentaires de sols sur d'anciennes plantation.	46
0	Synthèse générale	52
	<ul> <li>Des sols de structures variables avec des fertilités très diff</li> </ul>	érentes.
		52
	• Des évolutions différentes selon les itinéraires et les états	initiaux

# 1 - Introduction.

Avec la pression démographique planétaire, le changement d'usage des terres et l'impact de l'anthropisation sur les milieux forestiers tropicaux est en progression constante. C'est le cas de la Guyane française, un DOM couvert à 80% par la forêt naturelle. La forte croissance démographique (4%/an, 1999-2006, Millet, 2018) et économique (PIB +3.9%/an, 1993-2006, Attali *et al.*, 2008) accentue la pression anthropique qui s'exerce actuellement au détriment de l'environnement forestier. Sur ce territoire les activités agricoles et forestières gagnent sur la forêt naturelle dont le rôle sur la bande littorale est de fournir du bois d'œuvre et du bois biomasse pour la filière énergie.

Comme en Guyane, l'exploitation du bois d'œuvre en forêt naturelle n'est ni rentable économiquement et ni durable, les plantations pourraient être une alternative (Hérault et al. 2020) même s'il reste des freins à leur mise en place (Lopez 2016). Si pour fournir les besoins annuels actuels de bois d'œuvre (80 000 m<sup>3</sup> de grumes) et de biomasse, 10 000 à 20 000 ha de plantations forestières pourraient s'avérer suffisant à la Guyane d'ici 20 à 30 ans, cet espace est actuellement indisponible et ne pourra être gagné sur l'espace agricole déjà en quête de place. Si à moyen terme, les plantations forestières devront être réalisées sur des espaces agricoles plus ou moins dégradés et délaissés, aujourd'hui il est nécessaire de gagner une partie de cet espace sur la forêt naturelle pour que les objectifs de sécurité énergétique visés par la Collectivité territoriale de Guyane soient atteints d'ici 2030. Cette présente étude s'inscrit dans la perspective de l'usage *a minima* d'espaces naturels forestiers, exploités jadis pour leur bois et finalement rétrocédés au secteur agricole et forestier en raison de dégâts d'exploitation plus ou moins importants.

En Guyane, les nouveaux espaces gagnés sur la forêt naturelle sont généralement acquis au travers de la mise en œuvre de défriche rudimentaires telles que l'abattage à la main assorti d'un brulis qui achève les travaux de dégagement des rémanents et fertilise le sol. Ce type d'itinéraire, aussi connu sous l'appellation anglophone « slash-and-burn », est de plus en plus souvent réalisé au moyen de bulldozers et/ou de pelles mécaniques pour abattre le couvert, récupérer quelques bois d'œuvre et mettre en andain les rémanents (gros et petits bois) au centre ou en bordure de parcelle ; les andains sont ensuite incendiés. Cet itinéraire est alors considéré comme non résilient, puisqu'il conduit à une dégradation du sol, plus particulièrement à sa compaction (Fritsch et Sarrailh, 1986 ; Grimaldi *et al.*, 1993 ; Davidson *et al*, 2008). En Guyane, la compaction des sols pourrait expliquer l'échec de nombreuses plantations d'arbres. Cependant, c'est un aspect qui n'a jamais été pris en compte, ni étudié lors de la mise en place des projets de plantations forestières. La compaction des sols est la conséquence majeure de la conversion de la forêt en espaces plantés. Juste après la déforestation, elle est maximale dans l'horizon de surface et généralement perceptible jusqu'à au moins 30 cm de profondeur (Grimaldi et al. 1993; Page-Dumroese et al., 2006; Powers et al., 2005; Don et al., 2011). Elle est caractérisée par une augmentation de la densité apparente (da; Nawaz et al., 2013; Cresswell et Hamilton, 2002), une diminution de la porosité (Grimaldi et al., 1993), une résistance à la pénétration mécanique (Viana *et al.*, 2014), une diminution de la vitesse d'infiltration des eaux de pluie, ainsi que l'apparition éventuelle d'hydromorphie (Dawidowski et Koolen, 1987). La déforestation par abattis-brûlis peut aussi mener à une érosion hydrique importante, en raison de la faible couverture du sol et de la dégradation de la structure du sol (Fritsch et Sarrailh, 1986; Grimaldi et al., 1993). La compaction du sol est perceptible sur plusieurs années, voire dizaines d'années (Kozlowski 1999 ; Page-Dumroese et al., 2006). Ses conséquences sur la végétation sont (1) à l'échelle de l'arbre, une limitation de la croissance racinaire (Daddow et Warrington, 1983), plus particulièrement quand la da dépasse une valeur seuil (« Growth-limiting bulk density »); (2) à l'échelle du peuplement, une diminution du rendement/productivité des cultures ou plantations (Powers et al., 2005; Viana et al., 2014). Le non-retour rapide à l'état initial des propriétés physiques du sol dans les couches plus profondes (résilience) remet en cause les méthodes classiques de défriche mécanisée. Des alternatives existent en termes de préparation et d'itinéraires.

La méthode « chop and mulch » est une première alternative de déforestation sans brûlis. Elle consiste à broyer une partie de la végétation forestière en mulch qui est laissé à la surface du sol (Davidson et al., 2008). Elle induit à court terme une compaction limitée des 10 premiers centimètres du sol (Fujisaki 2014), bien que la densité apparente puisse augmenter *via* le passage supplémentaire des machines au sol (Reichert et al., 2014). Elle évite l'érosion des sols grâce aux débris de bois qui ont protégé le sol de l'énergie cinétique des pluies (Fujisaki, 2014). Dans les conditions climatiques de la Guyane ou similaires, nous avons trouvé peu d'études rapportant la mise en œuvre de cet usage après déforestation (Davidson et al., 2008 ; Fujisaki, 2014 ; Fujisaki et al., 2017). Par ailleurs, en Guyane, la plupart des études concerne un seul site (Combi) qui ne comporte que des Ferralsols à drainage profond, avec une texture principalement sableuse (~20% d'argiles de 0 à 30 cm ; Fujisaki, 2014). A notre connaissance, aucune étude n'a encore considéré des sols plus argileux qui sont très représentés en Guyane. Les observations reportées par Fujisaki (2014) en matière de compaction sont-elles valables pour des sols plus argileux ?

La mise en place d'un couvert herbacé (graminées, légumineuses) est une deuxième méthode alternative qui peut permettre de restaurer la structure de sol compacté grâce à son système racinaire (Lesturgez *et al.*, 2004). Par ailleurs, le couvert herbacé peut constituer un relais de protection efficace du sol pour pallier à la « fonte » rapide par décomposition du mulch sous climat tropical à forte pluviométrie. Finalement, l'association de la méthode « chop and mulch » avec un couvert herbacé qui, à notre connaissance, n'a jamais été testée dans les plantations forestières, semble constituer une alternative intéressante pour la Guyane.

L'objectif de cette étude est d'étudier l'évolution sur 2 à 3 ans des propriétés du sol d'une parcelle forestière qui a été soumise à une défriche mécanisée alternative (utilisation d'engin sur chenilles < 25 t, absence de brulis et préservation de la litière forestière), assortie d'un broyage des rémanents de défriche (constitution d'un mulch) et de la mise en place d'un couvert herbacé sous un climat à très forte pluviométrie. Nous avons supposé que (i) cet itinéraire alternatif a induit à court terme (juste après réalisation) une compaction du sol qui est maximale en surface et perceptible jusqu'aux 30 premiers cm ; (ii) un an après défriche, le sol n'a pas retrouvé les propriétés physiques de l'état initial T0, aussi bien en surface qu'en profondeur.

Le suivi des sols de la parcelle de Regina a fait l'objet de la publication d'un article dans la revue BFT (Bois et Forêts des Tropiques) :

 Guerrini X., Freycon V., de Haldat du Lys A., Nicolini E.A., 2021. Dynamique contrastée de la compaction d'un Ferralsol après une défriche mécanisée alternative en Guyane française. *Bois et Forêts des Tropiques*, 348:65-78. Doi: <u>https://doi.org/10.19182/bft2021.348.a36751</u>.

Dans ce chapitre, la partie concernant le site de Regina est tout naturellement tirée de cet article. Toutefois, depuis sa soumission, un dernier inventaire a été réalisé sur ce site et de nouvelles données ont été analysées. Les résultats de ces dernières analyses ont été inclus dans ce chapitre.

# 2 - Situation topographique et suivi des sols sur les 3 parcelles.

## Le site de Regina-Toulouri.

<u>Situation topographique</u>. D'une superficie de 7,2 ha, la parcelle est située sur un paysage de type « Multi-convex and joint-valley » (fig. 1), constitué de collines



basses et de larges vallées (Guitet *et al.*, 2013). Son altitude est comprise entre 47 et 63 m, tandis que le cours d'eau le plus proche est à une altitude de 40 m. Les pentes de la parcelle sont faibles à modérées (< 20%) à miversant. Son modelé est entaillé par 3 thalwegs sans cours d'eau permanent : l'un au nord-est et les deux autres dans sa partie ouest.

Fig. 1. Situation topographique de la parcelle de Regina (A) et pourcentages de pentes des 21 placeaux (B).

<u>Protocole</u> d'étude des propriétés <u>physicochimiques des sols.</u> Avant défriche (T<sub>0</sub>), 5 points de contrôle permanents ont été positionnés (Phys1 à Phys5 ; Fig. 2) afin d'être représentatifs de la variabilité pédologique et topographique de la parcelle, et en évitant les anciennes pistes de débardage encore visibles. Un dernier point de contrôle, témoin (Phys 6) a été rajouté en dehors de la parcelle sous couvert forestier.

## Fig. 2. Placettes et points de contrôle (Phys 1 à 6) sur la parcelle de Regina.



Quatre campagnes de mesure des propriétés

physicochimiques des sols ont été réalisées (Fig. 3) : (i) la première en septembre

2017 (T<sub>0</sub>; « grande saison sèche ») quand le couvert forestier initial était encore présent; (ii) la deuxième en décembre 2017 (T<sub>1</sub>; « petite saison des pluies »), juste après la défriche et avant la plantation, (iii) la troisième en septembre 2018 (T<sub>2</sub>; « grande saison sèche »), et la dernière en octobre 2020 (T<sub>3</sub>; « grande saison sèche »), 22 mois après la plantation.



<u>Fig. 3. Pluviométrie et</u> <u>calendrier des relevés</u> <u>pédologiques sur la</u> <u>parcelle de Regina.</u>

Lors de chaque campagne, nous avons mesuré (i) la quantité de litière du sol, (ii) la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol, (iii) la densité apparente, (iv) et nous avons prélevé des échantillons en vue d'analyses granulométriques et chimiques au laboratoire au voisinage immédiat de chacun des 5 points de contrôle (Phys1 à Phys5).

Les différents composants de la litière du sol (feuilles, branches, graines ...) ont été prélevés lors de chacune des 3 campagnes de mesure sur un carré de 0,25 m<sup>2</sup> jusqu'à atteindre l'horizon organo-minéral A du sol. Nous avons répété cette mesure 3 fois de manière aléatoire dans un rayon de 5 m autour de chaque point de contrôle (soit 15 prélèvements disjoints par campagne comptant pour 3,75 m<sup>2</sup> échantillonnés). Les prélèvements ont été séchés en étuve à 105 °C pendant au moins 24 h, triés suivant leur nature ligneuse ou non, puis tamisés suivant plusieurs fractions  $\leq 2$  mm, entre 2 et 5,6 mm, > 5,6 mm et supérieur à une dizaine de centimètres (morceaux de bois).

Un seul relevé de la biomasse organique capitalisée du couvert herbacé a été réalisé à la fin de la période de mesure (30/04/2019). Ce relevé a consisté à prélever intégralement la biomasse épigée sur une surface unitaire de 0,16 m<sup>2</sup> au centre de chacune des 15 placettes avec couvert herbacé. Au laboratoire, chaque prélèvement a été séché durant 3 jours à 105 °C, puis pesé (masse sèche anhydre ; MS) après séparation des différentes fractions (<2mm, 2mm<x<5,6mm, >5,6mm, matière ligneuse > 2cm).

La vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol a été mesurée en effectuant le test simplifié de Beer-Kan (Braud et al., 2005). Plus précisément, un volume d'eau de 20 cl a été versé dans un cylindre PVC de 16 cm de diamètre et de 10 cm de haut, enfoncé de 2 à 4 cm dans le sol de surface dont la couverture éventuellement présente (litière, mulch) a été intégralement préservée. Cette quantité d'eau versée équivaut à une lame d'eau de 10 mm de hauteur. Le volume d'eau a été versé sur un film plastique préalablement posé au fond du cylindre pour éviter un effet « splash » et la formation d'une croute de battance qui aurait modifié la vitesse d'infiltration de l'eau. Nous avons ensuite mesuré la durée entre l'instant où le film plastique a été retiré et celui où l'eau avait intégralement disparu de la surface du sol dans le fond du cylindre. Dès que le fond du cylindre était vide d'eau, nous avons répété cette opération et la mesure, jusqu'à ce que la durée soit constante pendant au moins 3 mesures. Cette durée correspond à la vitesse d'infiltration en condition saturée. En pratique, lors des campagnes T0 et T1, le test d'infiltration a été réalisé pour chacun des 5 Phys en infiltrant 5 à 15 volumes d'eau par test. Toutefois, lors de la campagne T2, le test a été réalisé sur 15 points qui correspondaient aux 5 Phys et mais aussi à 10 points complémentaires afin de prendre en compte les 3 modalités suivantes : Présence d'un couvert herbacé avec ou sans mulch (n=5); mulch sans couvert herbacé (n=5); sol nu (n=5). Finalement, lors de la campagne T3, le test a été réalisé uniquement sur les 5 points Phys initiaux. Pour chaque test, nous avons estimé la vitesse d'infiltration en calculant la pente de régression entre le temps cumulé d'infiltration et le volume cumulé d'eau infiltrée, en considérant seulement les mesures à partir desquelles la durée d'infiltration était constante.

La densité apparente du sol a été mesurée à moins de 2 m de l'emplacement où a été mesuré la vitesse d'infiltration de l'eau, aux profondeurs de 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 et 25-30 cm, en appliquant la méthode du cylindre (Baize, 2000). Les échantillons prélevés avec un cylindre de 250 cm<sup>3</sup> ont été pesés à l'état sec après 48 h de séchage à 105 °C dans une étuve. La densité apparente a été calculée en faisant le rapport de sa masse anhydre par son volume initial (250 cm<sup>3</sup>). Par ailleurs, nous avons séparé la fraction d'éléments grossiers (> 2 mm) de la fraction de terre fine ( $\leq$  2 mm) au moyen d'un tamis pour chaque échantillon prélevé. Les différentes fractions ont ensuite été pesées à l'état sec après une nouvelle séquence de 24 h de séchage à 105 °C dans une étuve.

#### Résultats.

<u>Evolution de la surface de la parcelle (Pl. 1)</u>. A T0, la parcelle était intégralement recouverte de forêt (photo 1a). A T1, la surface de la parcelle était majoritairement recouverte de mulch et le couvert herbacé était au stade de germination. La première espèce herbacée à s'installer a été le riz pluvial, mais de manière clairsemée (photos 1c, 1d et 1e). Puis *C. pascuorum* s'est installé entre les plants de riz sur l'ensemble de la parcelle semée comblant les vides. Finalement, Stylosanthes guianensis qui aura été l'espèce la plus tardive, a intégralement supplanté toutes les espèces qui ont soit disparu (riz), soit devenues rares (C. pascuorum) en juillet 2018 (photo 1f), B. humidicola ne s'étant jamais développée. A T2, S. guianensis couvrait toujours et de manière exclusive les placettes semées (photo 1g). Sa biomasse épigée était de  $2,02 \pm 0,53$  kg/m<sup>2</sup> de MS. Dans les placettes sans couvert herbacé, le sol était nu ou couvert de mulch (photo 1h).

Pl. 1. Aspects de la parcelle entre le démarrage et la fin de l'étude. Photo 1a : à T0 avant défriche; Photo 1b: broyage desrémanents après défriche ; Photo 1c : à T1, germination du riz pluvial; Photo 1d et 1e:installation clairsemée du rizpluvial dansuneplacette de tecks ; Photo 1f: installation etdomination de**Stylosanthes** guianensis dans une placette de tecks ; Photo 1g : à T2 dans une

placette de tecks avec couvert herbacé de S. guianensis ; Photo 1h : à T2 dans une placette de bagasses (Bagassa guianensis) sans couvert herbacé.



g septembre 2018

h septembre 2018

<u>Description du profil de sol (réalisée par V. Freycon).</u> La description est effectuée dans une fosse (Fig. 4 et 5) située au point de contrôle Phys4.

Horizon 1 [0 - 5 cm] Sec. Absence de taches. Argilo (-sableux). Structure particulaire. Très poreux. Racines très nombreuses, majoritairement fines, puis





moyennes puis grosses. 60% en volume de graviers de cuirasse irréguliers émoussés.

Horizon 2 [5 - 35/55 cm] Frais. Absence de Argilo (-sableux). Structure taches. sub-anguleuse polyédrique 10 mm modérée et sous-structure microagrégée. Poreux. Racines nombreuses dans la partie supérieure puis peu nombreuses dans la partie inférieure, majoritairement moyennes, puis fines. 60% en volume principalement de graviers de cuirasse (et quelques cailloux) arrondis ou émoussés.

Horizon 3 [35 – 55/80 cm] Frais. Absence de taches. Argileux. Structure polyédrique sub-anguleuse 40 mm modérée et sousstructure microagrégée. Peu poreux. Racines peu nombreuses, fines. 2% en volume de graviers de cuirasse, irréguliers émoussés.

Fig. 4. Profil de sol dans la fosse creusée sur le site de Regina © V. Freycon.

Horizon 4 [55 - 80 cm] Frais. Absence de taches. Argileux. Structure polyédrique sub-anguleuse 10 mm modérée et sous-structure microagrégée. Peu poreux. Racines peu nombreuses, fines. « Banc » de cuirasse continue qui se casse avec le marteau. Sous cette cuirasse, présence de 30% en volume de cailloux de cuirasse aplatis anguleux.

Sol à texture homogène, principalement argileuse. Couleur de teinte jaune (10YR) homogène  $\rightarrow$  qualifiée de Xanthic. Présence d'une sous-structure micro agrégée modérée à partir de 30 cm  $\rightarrow$  horizon Ferralic, ainsi que la présence de très nombreux graviers de cuirasse dès la surface et de 35 à 55 cm d'épaisseur  $\rightarrow$ horizon Petroplinthic. Présence d'un bloc de cuirasse dès 10 cm de profondeur  $\rightarrow$  horizon Petroplinthic. Proposition : Plinthosol, ou PisoplinthicFerralsol (Xanthic). C'est un sol homogène à drainage vertical libre sur son ensemble.

Fig. 5. Vue synthétique du profil.

Les sols se sont développés à partir de l'altération de granites guyanais du Précambrien. Comme classiquement observé en Guyane (Boulet 1978), des Ferralsols à structure micro-agrégée et bon drainage occupent le sommet et le haut de versant de la colline. Ils évoluent à partir de mi-versant en Acrisols à moins bon drainage, plus particulièrement en bas de versant et au voisinage des thalwegs. Sur le sommet de colline, les Ferralsols contiennent 10 à 20% de graviers de cuirasse arrondis nommés pisolithes dès l'horizon de surface, ainsi que de gros blocs de cuirasse parfois présents dès 40 cm de profondeur.

Prof.	$\mathbf{p}\mathbf{H}_{eau}$	Corg	N total	C/N	P (a)	CEC (b)	Ca <sup>2+</sup>	$Mg^{2+}$	<b>K</b> +	Na+	TS
cm		%	‰		mg.kg <sup>-1</sup>		me/100g				%
0-5	4,4	4,3	3,1	14,2	<ld< td=""><td>12,3</td><td>1,8</td><td>0,9</td><td>0,08</td><td>0,06</td><td>22</td></ld<>	12,3	1,8	0,9	0,08	0,06	22
5-35	4,6	2,2	1,8	12,5	<ld< td=""><td>8,3</td><td>0,4</td><td>0,2</td><td>0,02</td><td>0,02</td><td>8</td></ld<>	8,3	0,4	0,2	0,02	0,02	8
35-55	4,6	0,9	0,7	12,9	<ld< td=""><td>5,1</td><td>0,2</td><td>0,1</td><td>0,0</td><td>0,02</td><td>6</td></ld<>	5,1	0,2	0,1	0,0	0,02	6
55-80	5,0	0,8	0,6	13,5	<ld< td=""><td>4,1</td><td>0,4</td><td>0,2</td><td>0,0</td><td>0,02</td><td>16</td></ld<>	4,1	0,4	0,2	0,0	0,02	16

Tab. 1. Propriétés chimiques à T0 du profil de sol (fosse en haut de versant de la parcelle). Dosage ICP-AES des cations échangeables (Acétate d'ammonium) + CEC ; <sup>(a)</sup> Dosage par colorimétrie du P assimilable (Olsen) ;<sup>(b)</sup> Méthode Metson (acétate d'ammonium, pH7). <LD : inférieur à la limite détectable.

<u>Caractéristiques chimiques</u>. Globalement, les sols sont acides et désaturés (Tab. 1). Sans surprise, c'est au niveau de la couche (0-10 cm) que les valeurs de matière organique (MO), carbone (C) et azote total (N) sont les plus élevées (Fig. 6). C'est aussi au niveau de cette couche que les valeurs de MO et C connaissent une tendance à l'augmentation de T0 (avant défriche) à T1 (après défriche). En revanche, nous n'observons pas de changement entre T1 et T2. Aucune tendance au changement n'est observée pour l'azote d'une date à l'autre.



Fig. 6. Evolution sur 1 an des quantités de carbone organique (C %) et d'azote total (N ‰) à différentes profondeurs (0-10, 10-20 et 20-30 cm) pour les 5 points de contrôle Phys au cours des inventaires successifs T0 (09/2017), T1 (12/2017) et T2 (09/2018).

<u>Granulométrie</u>. Au sein de la parcelle, sous couvert forestier (T0), les teneurs en argile, sables et limons jusqu'à 30 cm de profondeur des 5 points de contrôle (Phys 1 à 5) variaient respectivement entre 19 et 50%, 42 et 79%, et 2 et 9% (Fig. 7).

Fig. 7. Triangle des textures pour les sols (0-30 cm) de la parcelle de Regina.



Toutefois, nous avons observé que

la granulométrie varie en fonction de la topographie et donc de l'altitude (Fig. 8), avec une teneur en argile qui diminue du sommet de colline (50%) à mi-versant (24%). Phys1, point le plus haut de la parcelle sur un plateau, a la texture la plus argileuse (49 à 50%). Phys2, légèrement plus bas, a une teneur en argile légèrement plus faible (45 à 47%). Phys5 et Phys3, situés en haut de versant ont encore moins d'argile (34 à 39%). Phys4, point le plus bas situé à mi-versant, a la texture la moins argileuse (19 à 29%) et en parallèle la plus sableuse (66 à 79%).



Una analyse de la composition granulométrique jusqu'à 100 cm de profondeur sur 5 points de contrôle supplémentaires situés en sommet ou en bas de pente (Fig. 9) confirme la part prédominante des sables (> 50%) en bas de pente au détriment de la part des argiles (< 30%) que ce soit en surface (0-20 cm) ou en profondeur (100 cm). La figure 9 souligne aussi qu'en bas de pente, la part des sables grossiers est

supérieure à 40%, tandis qu'elle est comprise entre 20 et 30% en sommet de pente sans changement net de la fraction des sables fins.



Fig. 9. Evolution de la part des différents composants granulométriques en fonction de la situation topographique (sommet ou bas de pente) dans les sols (0-100 cm) du site de Regina à partir de 3 sondages en bas de pente et 2 sondages en sommet de pente.

Ces 5 composants constituent la terre fine (TF) du sol. Celle-ci ne comprend pas les graviers de cuirasses qui font partie des éléments grossiers et son exclus de l'analyse granulométrique. Néanmoins, ils sont présents en grande quantités dans les sols du site de Regina sous la forme de graviers de cuirasse d'une densité de 2,8. Le volume qu'ils occupent évolue en fonction de la profondeur (Fig. 10) : ils occupent environ 20% du volume de sol à 5 cm de profondeur, plus de 30 % entre 15 et 20 cm, tandis qu'au-delà, ce pourcentage décroit graduellement pour devenir négligeable (2%) avec la profondeur. Cette présence dans les 30 premiers centimètres de sol est un aspect essentiel à considérer car ces graviers de cuirasses diminuent d'autant les quantités d'eau stockées par le sol et constituent une réel obstacle physique et « hydrique » que les végétaux aux stades jeunes doivent avoir

franchi en grande saison sèche pour se mettre à l'abri du stress hydrique.

Fig. 10. Evolution du volume de graviers de cuirasses avec la profondeur (0-30cm) dans les sols de la parcelle de Regina.



# Litière du sol. A T0, le sol des points

de contrôle était recouvert en moyenne de  $1,68\pm1,22~{\rm kg/m^2}$  de MS composée de

litière forestière (Fig. 11). A T1, il était recouvert de  $4,41 \pm 3,81 \text{ kg/m}^2$  de MS composée majoritairement du mulch de la matière ligneuse (64%) apportée par le broyage des rémanents (Fig. 1). A T2, le sol était encore recouvert de  $2,35 \pm 2,02 \text{ kg/m}^2$  de MS. Cette MS est représentée pour plus de la moitié par la matière ligneuse apportée par le broyage des rémanents, l'autre moitié étant représentée par de la MS plus fine issue de la litière forestière mais aussi de la dégradation plus avancée des rémanents de défriche (feuilles et petits rameaux). A T3, la parcelle avait quasiment retrouvé des valeurs de litière assez similaires aux valeurs initiales.



Fig. 11. Box plots des masses anhydres  $(kg/m^2)$ desdifférentes fractions constituant la couverture de matière organique recouvrant le sol au cours des 3 campagnes de mesures : avant  $(T_0;$ litière forestière) et après défriche ( $T_1$  et  $T_2$ ; mulch). Ces différentes fractions sont les éléments issus des productions organiques principalement végétales feuilles) avant des(tiges, tailles différentes en raison de leur degré de décomposition au moment des mesures :< 2mm, comprises entre 2 et 5,6mm, > 5,6 mm et supérieur à une dizaine de centimètres (gros bois).

<u>Densité apparente</u> (da). A T0, les da étaient en moyenne comprises entre 0,88 et 1,40 (Tab. 2). Les valeurs les plus faibles étaient en surface (0-5 cm) comme cela est classiquement observé. A T1, les da étaient en moyenne comprises entre 1,28 et 1,49.

Tab. 2. Evolution de la densité apparente moyenne durant les 4 campagnes de mesures, à différentes profondeurs. Les valeurs représentent les moyennes  $\pm$  écart-type, calculées à partir des 5 points de contrôle. Pour profondeur, leschaque lettres indiquent des différences (Analyse de variance à mesures répétées, en considérant la campagne de mesure à effet fixe et les points de mesure à effet aléatoire, P < 0.05 entre les campagnes.

Profondeur	ТО	Τ1	Τ2	Т3
$0-5~{ m cm}$	0,88±0,22b	1,28±0,12a	1,01±0,12b	1,11±0,17b
$5-10~{ m cm}$	1,19±0,17b	1,41±0,10a	1,46±0,06a	1,28±0,16b
10-15 cm	1,34±0,10a	1,47±0,11a	1,53±0,17a	1,43±0,13a
15-20 cm	1,31±0,08b	1,49±0,14a	1,53±0,09a	1,54±0,11a
$20-25~\mathrm{cm}$	1,30±0,09c	1,43±0,10b	1,57±0,07a	1,51±0,07a
25-30 cm	1,40±0,12b	1,42±0,12b	1,58±0,15a	1,52±0,06a

Entre T0 et T1, la DA a augmenté significativement à 0-5, 5-10, 15-20 et 20-25 cm de profondeur, en moyenne respectivement de 0,40, 0,22, 0,18 et 0,13 (Tab. 2). Plus globalement, pour un Phys et une profondeur donnée, la da en T1 avait presque toujours des valeurs plus élevées qu'en T0 (Fig. 12 ; A). De plus, l'augmentation de la DA entre T0 et T1 était très corrélée négativement ( $R^2 = 0,83$ ) à la DA initiale en T0 : importante (64 à 82%) quand les DA à T0 étaient faibles (< 0.9) et quasi-nulle quand les da à T0 étaient proches de 1,4 (Fig. 12).

A T2, les da étaient en moyenne comprises entre 1,01 et 1,58 (Tab. 2). Entre T1 et T2, la da a significativement diminué à 0-5 cm de profondeur de 0,27, tandis qu'elle a augmenté à 20-25 et 25-30 cm de profondeur, en moyenne respectivement de 0,14 et 0,16. Finalement, entre T0 et T2, la da a significativement augmenté à 5-10, 15-20, 20-25 et 25-30 cm de profondeur, en moyenne respectivement de 0,27, 0,22, 0,27 et 0,18.

A T3, les DA étaient en moyenne comprises entre 1,11 et 1,54 (Tab. 2). Entre T2 et T3, la DA a significativement diminué à 5-10 cm de profondeur de 0,18, tandis qu'elle est stable aux autres profondeurs (10-15, 15-20, 20-25 et 25-30 cm). Finalement, entre T0 et T3, la DA a significativement augmenté à 15-20, 20-25 et 25-30 cm de profondeur, en moyenne respectivement de 0,23, 0,21 et 0,12.



Fig. 12. Densité apparente à T1 (après défriche), à T2 (8 mois après plantation) et à T3 (20 mois après plantation), relativement à la densité apparente précédente initiale : T0-T1 (A), T1-T2 (B) et T2-T3 (C). La ligne matérialise des densités apparentes égales entre Tx en abscisse et Tx+1 en ordonnée.

<u>Vitesse d'infiltration de l'eau</u>. A T0, la vitesse d'infiltration moyenne était de 111 cm/h. Cette propriété était bien corrélée positivement avec la teneur en argile des Phys ( $R^2 = 0,76$ ). A T1, cette vitesse moyenne avait chuté à 2 cm/h, soit 55 fois moins élevée qu'en T0. A T2, cette vitesse moyenne était spectaculairement remontée à 149 cm/h, soit 65 fois plus élevée qu'en T1. Quel que soit l'état de surface du sol (couvert herbacé, mulch, sol nu), elle était toujours significativement plus élevée qu'en T1 (Fig. 13). De plus, la vitesse d'infiltration en T2 était

généralement supérieure à celle en T0 pour les sols sous couvert herbacé, similaire pour les sols avec mulch et légèrement inférieure pour les sols nus. En T3, l'infiltration moyenne mesurée de nouveau sur les 5 points de contrôle PHYS était de 339 cm/h. Toutefois, nous n'excluons pas des artefacts de mesure. En effet, ce dernier relevé a été réalisé avec des étudiants dans le cadre d'un module d'enseignement. Cet aspect nous incite à considérer plutôt la moyenne géométrique de 141 cm/h moins influencée par les valeurs extrêmes : c'est une valeur finalement très proche de celle mesurée en T2 et en T0.







Fig. 14. Masse de terre fine (TF) et des éléments grossiers (EG) mesurés à 0-10, 10-20 et 20-30 cm de profondeur à T0, T1, T2 et T3. Les points noirs représentent les valeurs mesurées. Les modalités avec une lettre commune n'ont pas de médianes significativement différentes entre campagnes de mesure, pour une fraction granulométrique (TF, EG) et une profondeur donnée.

<u>Terre fine et éléments grossiers</u>. La masse de la fraction d'éléments grossiers est très variable, plus particulièrement dans la couche de surface. Néanmoins, elle n'a montré aucune évolution significative entre T0 et T3 (Fig. 14), quelle que soit la profondeur. La même observation a été faite pour la fraction de terre fine à 0-10 cm et 10-20 cm de profondeur. En revanche, la masse de la terre fine à 20-30 cm de profondeur a augmenté significativement entre T0 et T2 pour se stabiliser en T3 (Fig. 14).

#### Discussion.

**Compaction maximale en surface juste après la défriche.** Nous avions supposé que la défriche mécanisée alternative provoquerait une compaction du sol qui maximale en surface sur le court terme, c'est-à-dire à la fin de la défriche. Nos résultats valident cette hypothèse puisque nous avons montré qu'après la défriche (T1), la compaction était la plus sévère quand la DA initiale était la plus faible, une spécificité de la couche de surface 0-5 cm. Nos résultats sont similaires à ceux trouvés par Page-Dumroese *et al.* (2006) à partir d'un réseau de 12 stations en Amérique du nord. Ils s'expliquent, d'une part, par une faible DA initiale et en parallèle une grande porosité et macroporosité dans la couche de surface grâce à l'activité biologique (macrofaune, racines fines, ...); et, d'autre part, par une réduction de cette macroporosité sous l'effet des forces de compression des machines utilisées lors du défrichement (Powers *et al.*, 2005). Notre étude étend donc à des sols tropicaux des résultats trouvés sur des sols tempérés d'Amérique du nord (Powers *et al.*, 2005; Page-Dumroese *et al.*, 2006).

De plus, nous avons trouvé que la forte compaction du sol en surface a été accompagnée de la perte quasi complète des capacités d'infiltration, avec une vitesse d'infiltration qui a chuté d'un rapport de 55 (i.e. de 111 à 2 cm/h) entre l'état initial sous couvert forestier (T0) et après la défriche (T1). Cette chute est plus importante que celle observée par Alegre et Cassel (1996) au Pérou, puisqu'ils avaient trouvé qu'un défrichement mécanisé avait réduit la vitesse d'infiltration d'un rapport de 8 (i.e. de 42 à 5 cm/h). Dans notre étude, la chute de la capacité d'infiltration a probablement été amplifiée par le fait que la fin de la défriche en 2017 (i.e. broyage des rémanents du 21/10 au 19/11, discage du 30/11 au 01/12) a été réalisée lors des premières pluies qui ont suivi la grande saison sèche. Ces premières pluies (65 mm entre le 26/11 et le 01/12/2017) ont certainement d'abord humecté la couche de surface, ce qui l'a rendue plus sensible à la compression, avec comme conséquence une interruption de la continuité des pores (Schack-Kirchner *et al.*, 2007). Bien que la durée de la grande saison sèche en Guyane française soit assez courte, nous recommandons donc que tous les travaux de défriche soient

entièrement terminés avant le démarrage de la saison des pluies (mi-novembre) pour éviter d'amplifier la compaction du sol de surface.

Epaisseur impactée par la compaction juste après la défriche. Nous avions supposé que la défriche mécanisée alternative provoquerait une compaction du sol jusqu'aux 30 premiers centimètres de profondeur sur le court terme. Nos résultats valident partiellement cette hypothèse puisque nous avons observé après défriche (T1) une compaction du sol jusqu'à seulement 25 cm de profondeur. Nos résultats sont cohérents avec ceux de Grimaldi et al. (1993) qui observaient qu'après une déforestation mécanisée sur des Ferralsols en Amazonie, l'épaisseur du sol concernée par la compaction variait entre 20 et 40 cm de profondeur. Plusieurs études ont expliqué la propagation de la compaction des couches superficielles aux couches plus profondes (Ampoorter et al., 2007; Nawaz et al., 2013). Lors du 1er passage, la compaction affecte principalement la couche de surface qui absorbe les forces de compression en perdant sa macroporosité et en se densifiant. Lors des passages suivants, les forces de compression sont transmises par les couches de surface densifiées aux couches profondes qui se densifient à leur tour. Chaque passage supplémentaire d'engin propage un peu plus profond la densification. Ainsi, la densification/compaction peut aller jusqu'à 60 cm de profondeur (Greacen et Sands, 1980) en fonction du nombre de passage, du poids des engins et de la teneur en eau du sol.

Dans notre étude, la compaction ne s'est pas propagée au-delà de 25 cm malgré plusieurs passages (certainement < 10 passages) au cours du débardage des gros bois, ce qui aurait dû favoriser la compaction en profondeur (Greacen et Sands, 1980). Trois raisons pourraient expliquer ce résultat. La première raison est liée au fait que ce débardage des gros bois a été réalisé durant la grande saison sèche, période durant laquelle les sols ont généralement bien ressuyé sur tout le profil. Ceci a certainement limité la compaction en profondeur (Schak-Kirchner et al., 2007) et la formation d'ornières à la surface du sol. Dans notre étude, nos observations de terrain confirment ce point : (i) absence d'ornière à la surface du sol après la défriche mécanisée effectuée en 2017 durant la grande saison sèche ; mais (ii) présence d'anciennes ornières de 30 à 60 cm de profondeur, vestiges du passage d'engins de débardage lors d'une exploitation forestière effectuée en 2004 durant la saison des pluies. La deuxième raison est liée au fait que les couches de sols plus profondes sont intrinsèquement plus denses avec des valeurs moyennes de 1,4, donc peu sensibles à la compaction. Enfin, la 3<sup>ème</sup> raison est le faible poids des engins qui ont circulé et qui ont exercé une pression réduite sur le sol en g/cm<sup>2</sup> (Schjonning et al., 2012).

Plus d'un an après défriche, le sol a retrouvé les propriétés physiques de l'état initial T0 à 0-5 cm mais pas à 20-30 cm de profondeur. Nous avions supposé qu'après plus d'un an après défriche, le sol n'aurait pas retrouvé les propriétés physiques de l'état initial sous couvert forestier, aussi bien en surface qu'en profondeur. Nos résultats valident partiellement cette hypothèse puisque nous avons trouvé des résultats opposés entre la surface et la profondeur : la couche de surface 0-5 cm a retrouvé des valeurs de da et de capacité d'infiltration similaires à celles de l'état initial sous couvert forestier (hypothèse rejetée), tandis que les couches plus profondes ne sont pas revenues à leur état initial (hypothèse validée). Ce résultat pour la couche de surface 0-5 cm est peu courant. En effet, habituellement, il faut au moins 3 années (e.g. forêts du nord-est de la France, Goutal et al. (2012)), voire plusieurs dizaines d'années pour qu'un sol compacté par une exploitation forestière retrouve ses propriétés physiques initiales, même en surface (Kozlowski, 1989). Comme un sol reconstitue « naturellement » sa porosité et ses propriétés physiques principalement grâce aux racines fines qui ont une action précoce (Bottinelli et al., 2014), et grâce à la macrofaune du sol qui a une action plus tardive (Bottinelli et al., 2014; Capowiez et al., 2012), le retour rapide à des valeurs de da et de capacité d'infiltration initiales en surface est donc principalement relié aux différents choix de l'itinéraire (absence du brulis, couvert herbacé, mulch) qui ont favorisé le développement des racines fines et relativement préservé l'activité de la macrofaune du sol. Ainsi :

- (i) lors de la défriche, l'absence du brulis n'a pas rajouté un impact négatif sur la macrofaune du sol (Rossi *et al.*, 2010) à ceux causés par le retrait du couvert forestier et du tassement du sol (Ruiz *et al.*, 2008) ;
- (ii) Le couvert herbacé de S. guianensis s'est très bien développé avec une biomasse épigée de 20±5,3 t/ha de MS, similaire à celle observée par Saito et al. (2006) au Laos. L'excavation de plus d'une dizaine de pieds issus du couvert herbacé de S. guianensis a permis d'observer la présence généralisée et en abondance de leurs racines dans les 15 premiers cm de profondeur. Nos observations corroborent celles de Lesturgez et al. (2004) qui ont montré en Thaïlande et sur sols sableux que les racines de Stylosanthes hamata ont la capacité de pénétrer des couches compactes après une période de culture comprise entre 4 mois et 2 ans, en augmentant la macroporosité du sol.
- (iii) le mulch a certainement protégé la macrofaune du sol qui a pu subsister dans les couches superficielles du sol après la défriche. Cette macrofaune, majoritairement composée de lombrics (adultes, œufs) et de fourmis, occasionnellement de termites, a certainement bénéficié de la protection du mulch, connu pour maintenir fraicheur et humidité (Manu *et al.*, 2017).. Dans ces conditions, la macrofaune a pu reprendre plus rapidement et régénérer en partie la macroporosité perdue (Lal, 1988).

Notre protocole expérimental ne nous a pas permis d'estimer l'effet des différents états de surface du sol (couvert herbacé, mulch, sol nu) sur la DA du sol de surface. En revanche, il nous a permis d'estimer leur effet sur la capacité d'infiltration en surface, 9 mois après que cette capacité avait drastiquement chuté de 111 cm/h (couvert forestier) à 2 cm/h (après défriche). Nous avons trouvé que cette capacité était remontée à des valeurs moyennes de 297 cm/h, 95 cm/h et 54 cm/h, respectivement pour les sols sous couvert herbacé, les sols avec mulch et les sols nus (figure 4). Cette remontée a été spectaculaire pour les sols sous couvert herbacé puisque la capacité d'infiltration a même dépassé celle de l'état initial. Ce résultat suggère que les racines du S. guianensis jouent un rôle majeur sur la circulation de l'eau dans le sol qui suit certainement préférentiellement le réseau racinaire, notamment lorsque les racines meurent et laissent des « biopores » libres (Dexter, 1991). De plus, il est surprenant que les sols nus aient retrouvé des capacités d'infiltration correctes même si elles sont légèrement inférieures à celles de l'état initial, sous couvert forestier. En effet, comme cela a été montré par Natal da Silva et al. (2016) dans l'état du Minas Gerais, Brésil, la température à 5 cm de profondeur sous un sol nu peut atteindre 44 à 46°C durant la journée ; nous avons mesuré 44°C en plein midi dans les 7 premiers centimètres de sol (résultats non présentés). L'explication de ce retour à cette capacité d'infiltration doit plutôt être cherchée (i) d'abord, dans l'alternance marquée entre épisodes secs et épisodes humides en Guyane qui contribue à craqueler le sol de surface et rompre partiellement l'intégrité de la couche même compactée par un effet d'origine mécanique (Dexter 1991) qui améliorent alors la capacité d'infiltration ; (ii) On ne peut toutefois exclure l'effet de la macrofaune qui n'a pas dû être si contrainte en l'absence de brulage. Par ailleurs, les taches de sol nu étant de faibles dimensions  $(\pm 10 \text{ m}^2)$ , la macrofaune aura pu se propager depuis les zones couvertes de mulch vers les zones de sol nu ; (iii) Enfin, à l'instar des zones couvertes d'herbacées, , cette capacité d'infiltration retrouvée des sols nus pourrait aussi provenir de l'effet du développement latéral des racines des espèces plantées (Bagasse et Teck; jusqu'à 2 m des troncs dès la 1<sup>ère</sup> année), comme celui des recrus ligneux ou herbacés natifs qui n'étaient pas immédiatement arrachés manuellement (lors des entretiens périodiques).

Nous avons trouvé qu'un an après défriche, plusieurs couches en profondeur n'avaient pas retrouvé des valeurs de da similaires à celles de l'état initial, contrairement à celles de surface. Ce résultat est similaire à plusieurs travaux qui ont montré qu'après compaction, l'amélioration des propriétés physiques du sol était très lente, plus particulièrement en profondeur (Kozlowski, 1999 ; Nawaz *et al.*, 2013). Cette différence de vitesse de reconstitution entre la profondeur et la surface s'explique certainement par le fait que les deux principaux acteurs de la reconstitution de la porosité d'un sol, la macrofaune du sol et les racines fines, se trouvent majoritairement dans l'horizon de surface (Lal, 1988 ; Barros *et al.*, 2001). Par conséquent, l'impact positif de ces processus biotiques sur la porosité diminue rapidement avec la profondeur. Nous avons aussi trouvé que pour les couches 20-25 et 25-30 cm de profondeur, la DA avait continué d'augmenter malgré l'absence d'intervention mécanisée. Ce résultat est similaire à celui de Page-Dumroese *et al.* (2006) qui montraient que la DA à 20-30 cm continuait d'augmenter 5 ans après une exploitation forestière. Ce n'est donc pas l'aspect mécanique de l'intervention qui est à l'origine directe de cette aggravation mais plutôt le retrait du peuplement d'origine. Une explication à ce phénomène pourrait être le remplacement de la matière organique en décomposition (e.g. racines) par de la terre fine : la décomposition rapide de la matière organique dégage des espaces vides (macropores) qui sont remplis par de la terre fine. En effet, nous observons bien une augmentation de la masse de terre fine à la profondeur de 20 à 30 cm entre T0 et T2 (Fig. 14). D'où vient cette terre fine qui contribue à densifier cette couche ? Si elle provenait d'un lessivage, nous aurions dû aussi observer une diminution de la masse de terre fine de surface entre T0 et T2, ce qui n'est pas le cas. Finalement, l'hypothèse d'un affaissement et de la réduction de la macroporosité sous la pression des couches supérieures après minéralisation rapide de la matière organique reste la plus plausible. Cette progression de la DA n'est pas observée après 2 ans.

**Densité apparente et impact potentiel sur la croissance racinaire.** La compaction du sol est perceptible sur plusieurs années, voire dizaines d'années (Kozlowski 1999 ; Page-Dumroese *et al.*, 2006). Ses conséquences sur la végétation à l'échelle de l'arbre, une limitation de la croissance racinaire (Daddow et Warrington, 1983), plus particulièrement quand la DA dépasse une valeur seuil (« Growth-limiting bulk density ») présentée par la figure 15.

Fig. 15. Triangle des texture et seuils de densité apparente limitant la croissance racinaire  $(DA_{GL})$  d'après Daddow-Warrington (1983). Sont figurés aussi les 5 points de contrôle (Phys 1 à 5) de la parcelle de Regina positionnés sur la base de leurs valeurs granulométriques.

Sur cette figure représentant le triangle des textures, les sols les plus riches en argiles



sont considérés comme impactant sérieusement la croissance racinaire à partir d'une DA de 1,4. En revanche, les sols les plus sableux ne le sont qu'à partir d'une DA de 1,75. Finalement, la présence croissante de sable repousse le seuil de compaction vers des valeurs plus hautes. A Regina, la variabilité granulométrique des sols repose exclusivement sur les quantités d'argile et de sable, les % de limons variant très peu. Compte tenu de l'aspect linéaire de l'évolution de nos sols à Regina, le % d'argiles ou de sables peuvent être mis en vis-à-vis du seuil de DA limitant la croissance racinaire. Il est donc possible, à partir du graphe de Daddow-Warrington, d'établir le long de notre gradient, une évolution linéaire simple de la valeur du seuil de DA limitant la croissance (DA<sub>GL</sub>) en fonction de la teneur en argiles ou en sables. Toutefois avant de présenter les valeurs apparentes obtenues lors des inventaires, il est nécessaire de reconsidérer celle-ci avec cette question : à Regina, la DA « brute » reflète-elle la DA de la terre fine au travers de laquelle, les maines tent membres en 2

les racines vont progresser ?

Fig. 16. Pourcentages volumiques des différentes fractions (terre fine, éléments grossiers et espaces vides) constituant les sols prélevés lors des différents inventaires sur la parcelle de Regina.



En effet, comme le montre la figure

16, les sols de Toulouri renferme de nombreux éléments grossiers (EG) qui sont des pisolithes résultant du démantèlement de la cuirasse. Ces EG qui occupent en moyenne 25% du volume de sol, ne sont pas poreux, ils sont pleins et ont une densité de 2,8. Sans contribuer à la porosité du sol, ces EG contribuent à augmenter la DA du sol sans que la terre fine ne soit pour autant moins poreuse et donc plus dense. Ainsi, en faisant abstraction du volume constitué par les EG, nous observons qu'il reste 2 volumes d'espaces vides (~ 50%) entièrement contenus dans un seul volume de terre fine (~ 25%), ce qui nous fait une DA moyenne de la partie « terre fine + espaces vides » contenue entre les EG de 0,9 au lieu d'une DA de 1,38 pour l'ensemble « terre fine + espaces vides + éléments grossiers ». Les graphes suivants présentent les valeurs de DA en fonction de la teneur en argile susceptible de faire varier l'impact de la DA sur le développement racinaire. A Regina, sans exclure les EG (Fig. 17 A), beaucoup de valeurs de DA approchent, voire même franchissent la DA<sub>GL</sub> tracée en rouge. En revanche, après abstraction faite des EG, la plupart des valeurs de DA, même si elles ont significativement augmenté, restent bien inférieures aux valeurs de DAGL.



Fig. 17. Densité apparente (DA) en fonction de la teneur en argile des sols prélevés lors des différents inventaires (T1, T2 et T3) sur la parcelle de Regina. La courbe rouge matérialise les seuils de densité apparente susceptible de limiter la croissance racinaire (DA<sub>GL</sub>) d'après Daddow-Warrington (1983). En B, densité apparente du sol après retrait de la part d'EG. Chaque point correspond à la valeur de DA d'un prélèvement de sol réalisé entre 0 et 30 cm de profondeur (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, et 25-30 cm) sur les 5 points de contrôle (Phys 1 à 5).

La présence des EG en grandes quantités dans les 30 premiers cm de sol constitue un élément très limitant si les propriétés du sol se détérioraient (compaction supplémentaire de la terre fine). De manière intuitive, avec une densité de terre fine assez faible et une non limitation de l'eau en raison d'une pluviométrie importante à Regina, les EG ne constituent pas une menace immédiate pour les arbres : la progression rapide du front de racines profondes chez des végétaux en bon état sanitaire leur permet d'atteindre des couches de sols plus profondes, plus humides, renfermant bien moins de pisolithes, et de se mettre en sécurité. En revanche, une densification supplémentaire de la terre fine pourrait faire ressortir le caractère très limitant des EG en ralentissant le passage des racines chez des végétaux qui ne parviendraient pas à franchir la couche de sol pisolithiques et seraient contraint de passer la grande saison sèche dans cette couche, exposés à un stress hydrique sévère.

Finalement, si les sols de la parcelle de Regina sont considérés comme de très bons sols pour la Guyane, les sols de surface renfermant beaucoup d'éléments grossiers constituent un obstacle relativement important que les végétaux auront à franchir au moment de leur installation. Pour information, nous avons observé que l'émergence du recru adventif n'est pas « puissante » sur la parcelle de Regina, comme s'il « peinait » à se mettre en place. En effet, l'installation à partir de graine de nouveaux plants de la flore secondaire est de manière intrinsèque plus lente. Elle est d'autant plus compliquée avec un tel obstacle à traverser. Toutefois, cela ne signifie pas que le recru sur le site est peu puissant : une fois passé l'obstacle de la couche de pisolithes, les végétaux connaissent un développement très puissant.

La parcelle de Regina est posée sur des Ferralsols profonds et homogènes à drainage vertical libre en crête et sommet de pente, tandis qu'ils deviennent hétérogènes, à drainage latéral superficiel avec une diminution des quantités d'argiles au profit d'une augmentation des sables grossiers à mesure que l'on progresse dans la pente. Ainsi, sur cette parcelle posée sur un sommet de colline déjà relativement étroit, environ 1/3 de sa surface peut être considéré impropre à la plantation d'arbres forestiers en raison d'une hydromorphie temporaire et de la grande quantité de sables grossiers.

La préparation de la parcelle a démarré avec un mois de retard et a débordé sur la petite saison des pluies (broyage des rémanents, semis du couvert herbacé). Ce retard a occasionné une compaction de surface qui a totalement compromis l'absorption des eaux de pluies durant les 6 premiers mois après préparation. Cette compaction de surface se résorbe naturellement et plus rapidement grâce au développement racinaire du couvert herbacé de S. guianensis.

Par ailleurs la compaction, qui n'a affecté que les couches de surface, n'est pas seulement le fait du passage des engins mais aussi celui du remplacement naturel des racines du peuplement d'origine par de la terre fine. Cette préparation de la parcelle a augmenté la densité apparente du sol d'environ 0,2.

## Le site de Paracou.

<u>Situation topographique</u>. La parcelle de Paracou est installée dans l'empreinte de la précédente parcelle d'*Acacia mangium* et *A. crassicarpa*. Elle est située sur une colline encadrée à l'est et à l'ouest par 2 petites criques (Fig. 18). Vers le sud, cette colline se raccorde à une zone de podzol (sables blancs). Cette parcelle se trouve dans un paysage constitué de collines basses et de larges vallées. Son altitude est comprise entre 30 et 35 m, tandis que les criques qui l'entourent sont à une altitude d'environ 20 m.







<u>Protocole d'étude des propriétés</u> <u>physicochimiques des sols.</u> Avant défriche (T<sub>0</sub>), 5 points de contrôle permanents ont été positionnés (Phys 1 à 5 ; Fig. 19). Un dernier point de contrôle, témoin (Phys 6), a été rajouté en dehors de la parcelle sous couvert forestier.

Fig. 19. Localisation des 6 points de contrôle (Phys 1 à 6) et de la fosse pédologique sur la parcelle de Paracou.

Quatre campagnes de mesure des propriétés physicochimiques des sols ont

été réalisées (Fig. 20) : (i) la première en juin 2018 ( $T_0$ ; « fin de grande saison des pluies ») quand le couvert forestier initial était encore présent ; (ii) la deuxième en janvier 2019 ( $T_1$ ; « petite saison des pluies »), 2 mois après la fin de la défriche et avant la plantation, (iii) la troisième en septembre 2019 ( $T_2$ ; « grande saison

sèche »), et la dernière en septembre 2020 ( $T_3$ ; « grande saison sèche »), 22 mois après la plantation.



Lors de chaque campagne, nous avons mesuré (i) la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol, (ii) la densité apparente, (iii) et (iv) nous avons prélevé des échantillons en vue d'analyses granulométriques et chimiques au laboratoire au voisinage immédiat de chacun des 5 points de contrôle (Phys1 à Phys5). Les différentes méthodes sont identiques à celles mises en œuvre sur le site de Regina.

## <u>Résultats.</u>

Evolution de la surface de la parcelle. A T0, la parcelle était intégralement recouverte de forêt secondaire dans une ancienne plantation. A T1, la surface de la parcelle était majoritairement recouverte de mulch. Sur les parcelles semées, le couvert herbacé était au stade de germination. La première espèce herbacée à s'installer a été le riz pluvial, de manière clairsemée. Puis *C. pascuorum* s'est installé entre les plants de riz. Finalement, *Stylosanthes guianensis* qui aura été l'espèce la plus tardive, a intégralement supplanté toutes les espèces qui ont soit disparu (riz), soit devenues rares (*C. pascuorum*) en juillet 2019. A T2 et T3, *S. guianensis* couvrait toujours et de manière exclusive les placettes semées. Dans les placettes sans couvert herbacé, le sol était couvert de mulch, graduellement envahi par une végétation adventive ligneuse ou herbacée de plus en plus puissante dès T1.

<u>Pédologie.</u> La figure 21 présente une cartographie des sols empruntée à Hueber (1991). L'unité A (zone bleue) correspond à des sols sur la Série Détritique de Base à drainage vertical profond. Ils montrent d'épais horizons vivement colorés (brunjaune-rouge), argilo-sableux, à forte macroporosité, passant à la base à un horizon plus sableux au-dessus du matériau d'altération du socle, moins humecté et à porosité fine, matériau d'altération qui n'a jamais été observé à moins de 120 cm. De même, aucune concrétion ferrugineuse n'a été observée à moins de 120 cm de



profondeur. L'unité B (zone jaune) délimite des sols à drainage vertical encore profond. Les horizons à forte macroporosité, vivement coloré (brun-rouge-jaune), argilo-sableux puis argileux, sont assez épais et souvent riches en concrétions ferrugineuses; ils reposent entre 100 et 130 cm sur le matériau d'altération du socle, peu poreux et peu humecté, dont la relative profondeur autorise un drainage vertical encore profond.

Fig. 21. Cartographie des sols sur l'empreinte de l'ancienne parcelle d'Acacia mangium et A. crassicarpa d'après Hueber (1991).



# Description synthétique du profil (V. Freycon).

Horizon 1 [0-5 cm]. Sablo-argileux, très poreux. Racines très nombreuses, majoritairement fines, puis moyennes puis grosses. Absence d'éléments grossiers. Nombreux turricules de vers de terre sur une face latérale de la fosse.

Horizon 2 [5 - 20/30 cm]. Absence de taches. Sablo-argileux. Structure sub-anguleuse 40 polyédrique mm modérée. Poreux. Racines nombreuses, majoritairement fines, puis moyennes. Racines mortes aussi nombreuses. Absence d'éléments grossiers. Charbon de bois peu nombreux. Activités de vers de terre peu nombreuses.

Fig. 22. Profil pédologique en sommet de colline, dans une placette de Bagasse du site de Paracou© V. Freycon.



Horizon 3 [20/30 – 55 cm]. Taches très peu nombreuses, fines, nettes, contrastées, dans la matrice. Argilosableux. Structure polyédrique subanguleuse 45 mm modérée. Peu poreux. Racines très peu nombreuses, fines. Absence d'éléments grossiers. Racines mortes peu nombreuses. Charbon de bois peu nombreux.

Horizon 4 [55 – 75/80 cm]. Taches peu nombreuses, grosses, très nettes, très contrastées qui tapissent les parois des galeries. Argilo-sablo(-limoneux). Structure polyédrique sub-anguleuse 60 mm modérée et sousstructure microagrégée, 1 mm, modérée. Peu poreux. Racines très peu nombreuses, fines. Absence d'éléments grossiers.

Horizon 5 [75/80 – 125 cm]. Absence de taches. Argilosablo(-limoneux). Structure polyédrique sub-anguleuse 40 mm modérée mélangée à une structure microagrégée, 1 mm, modérée. Peu poreux. Racines très peu nombreuses, fines puis moyennes. Absence d'éléments grossiers.

#### Fig. 23. Vue synthétique du profil

Texture dominante sableuse en surface puis argileuse au-delà de 55 cm → horizon Argic → Acrisol (WRB). L'horizon 5 est typique d'une allotérite qui apparait avant 1m de profondeur → Sol à drainage latéral superficiel (IRD), confirmé lors de l'ouverture de la fosse par de l'eau qui suinte vers 20/30 cm à la limite entre l'horizon 2 et l'horizon 3. A ce drainage latéral s'ajoute certainement des conditions propices à un milieu réducteur au sein de l'horizon de surface qui sent mauvais. Les transitions entre les horizons sont peu marquées sur une grande épaisseur. En surface, le sol est de couleur sombre (mais Value = 4) jusqu'à 30 cm de profondeur, une épaisseur bien plus importante qu'en forêt naturelle (~ 5 cm), situation certainement liée à l'apport d'un mulch en cours de décomposition. Proposition : Acrisol (WRB) ; Sol à drainage latéral superficiel (IRD). Sol relativement bien drainant même si horizon 2 avec quelques taches d'oxydation peu nombreuses. Acrisol (WRB) Sol à drainage vertical ralenti (Alt).

En conclusion, le profil de Paracou-ForesTreeCulture 2 a les caractéristiques à la fois d'un Acrisol d'une forêt naturelle avec un drainage latéral superficiel, et d'un sol marqué par la compaction : flaques d'eau à la surface du sol, horizon de surface avec quelques taches et qui sent mauvais, signes de conditions réductrices. L'apport d'un mulch de rémanents d'arbres (BRF) contribue aussi certainement à un horizon de surface sombre (donc a priori riche en carbone organique) plus épais qu'en forêt naturelle (30 cm vs 5-10 cm)

Prof.	$\mathbf{p}\mathbf{H}_{eau}$	Corg	N total	C/N	P (a)	CEC (b)	Ca <sup>2+</sup>	$Mg^{2+}$	<b>K</b> +	Na+	TS	
cm		%	<b>%</b> 0		mg.kg-1		me/100g					
0-5	5.5	2,5	1,6	15,8	105,5	5,8	1,6	0,28	0,2	0,02	36	
15	4.8	1,7	1,2	14	1,25	4,4	0,1	0,26	0,03	0,02	9,8	
40	4.8	0,7	0,44	15	0,8	2,7	0,08	0,01	0,01	0,01	7,1	
70	4.6	0,6	0,36	15,3	<ld< td=""><td>2,6</td><td>0,07</td><td>0,09</td><td>0,01</td><td>0,00</td><td>6,5</td></ld<>	2,6	0,07	0,09	0,01	0,00	6,5	
100	4.4	0,3	0,15	18,3	<ld< td=""><td>2,2</td><td>0,08</td><td>0,08</td><td>0,01</td><td>0,00</td><td>7,3</td></ld<>	2,2	0,08	0,08	0,01	0,00	7,3	

<u>Caractéristiques chimiques.</u> Globalement, les sols sont acides et désaturés (Tab. 3).

Tab. 3. Propriétés chimiques à T0 du profil de sol (fosse en haut de versant de la parcelle). Dosage ICP-AES des cations échangeables (Acétate d'ammonium) + CEC ; <sup>(a)</sup> Dosage par colorimétrie du Phosphore assimilable (Olsen) ;<sup>(b)</sup> Méthode Metson (acétate d'ammonium, pH7). <LD : inférieur à la limite détectable=0.68.

Pour ce qui est de la matière organique (MO), du carbone (C) et de l'azote total (N), sans surprise, c'est au niveau de la couche de sol de surface (0-10 cm) que les valeurs sont les plus élevées (Fig. 24). C'est aussi au niveau de cette couche de surface que les valeurs de MO et de C connaissent une tendance à l'augmentation de T0 (avant défriche) à T1 (après défriche), puis de T1 à T3. Nous ne disposons de valeurs pour T2. Pour ce qui concerne l'azote qui montre des valeurs moitié moindres qu'à Regina, aucune tendance au changement n'est observée d'une date à l'autre.



Fig. 24. Evolution sur 2 ans des quantités de carbone organique (C %) et d'azote total (N ‰) à différentes profondeurs (0-10, 10-20 et 20-30 cm) pour les 5 points de contrôle Phys au cours des inventaires successifs T0 (07/2018), T1 (01/2019) et T3 (10/2020).

<u>Granulométrie</u>. Au sein de la parcelle, sous couvert forestier (T0), les teneurs en argiles, sables et limons jusqu'à 30 cm de profondeur des 6 points de contrôle (Phys 1 à 6) variaient respectivement entre 16 et 27%, 67 et 79%, et 3 et 6% (Fig. 25).

Fig. 25. Triangle des textures pour les sols des points de contrôle (Phys 1 à 6; 0-30cm) de la parcelle de Paracou.

L'analyse granulométrique à plus grande profondeur en sommet de pente (fosse pédologique) montre que la quantité d'argiles progresse sensiblement avec la profondeur, passant de 16% à



38% (Fig. 26) sans modifications nette des limons fins ou grossiers, et des sables fins. En revanche, nous observons une diminution nette des sables grossiers, passant de 63% à 47%. La figure suivante souligne par ailleurs la part très majoritaire des sables grossiers dans le profil de sol de Paracou (~50%). Cette prédominance des sables grossiers est observée dans tous les points de contrôle Phys de la parcelle, comprise entre 50% et 62 %, et apparait comme une constante physique forte de ce site situé à proximité d'une zone de sables blancs.

Fig. 26. Composition granulométrique en fonction de la profondeur (0-100 cm) dans la fosse du site de Paracou.

La cartographie des sols proposée par Hueber (1991) met en évidence un rétrécissement net de la zone



des sols à drainage profond (unités A et B) au niveau de la partie sud de l'empreinte de l'ancienne parcelle d'acacias (carte précédente). A l'extérieur de cette zone, les sols sont attendus être moins drainants. C'est la raison pour laquelle des prélèvements supplémentaires de sol à la tarière (0-100cm de profondeur) ont été effectués en sommet et bas de pente dans des placettes numérotées de la partie sud de la parcelle selon un axe Sud-Nord. Les analyses granulométriques des 8 sondages supplémentaires montrent toujours la même partition décrite précédemment. En revanche, 2 sondages en bas de pente (placettes 5 et 7 ; les plus au sud) montrent des quantités de limons fins assez importantes (~ 20%) pour des sols guyanais (Fig. 27). Puis cette quantité va diminuant en progressant vers le nord. Ces fortes valeurs sont observées à 100 cm, mais aussi à partir de 50 cm de

profondeur uniquement dans la placette 5 (17%). Ainsi, nous envisageons l'existence ďun horizon limoneux peu profond (à partir de 50 cm) en bas de pente dans la partie sud de la parcelle. А noter que les sols en profondeur étaient tachés, signe d'hydromorphie temporaire.



Fig. 27. Evolution de la part des limons fins en fonction de la situation topographique (sommet ou

bas de pente) et de la localisation (axe Nord-Sud) dans les sols (0-100 cm) du site de Paracou. Les placettes 1 à 12 sont représentées selon une disposition et une orientation géographiques fidèles. Les barres des valeurs sont toujours représentées dans le même ordre pour chaque profondeur : 5, 7, 9 puis 11 pour les placettes de bas de pente ; 4, 6, 8 puis 10 pour les placettes en sommet de pente.

Profondeur	TO	T1	T2	T3	Моу
0-5 cm	1,12±0,12	1,10±0,11	1,17±0,11	1,22±0,09	1,16
5-10 cm	$1,37\pm0,05$	$1,39\pm0,05$	$1,35\pm0,07$	1,37±0,06	1,37
10-15 cm	1,46±0,09	$1,51\pm0,05$	1,42±0,04	$1,47\pm0,04$	1,47
15-20 cm	1,59±0,09	$1,57\pm0,07$	$1,53\pm0,07$	1,53±0,04	1,56
20-25 cm	$1,60\pm0,03$	$1,60\pm0,03$	$1,57\pm0,1$	1,54±0,04	1,58
25-30 cm	1,61±0,06	1,59±0,04	$1,56\pm0,03$	$1,59\pm0,05$	1,59
Моу	1,46	1,46	1,43	1,45	1,45

Tab. 4. Evolution de la densitéapparente moyenne durant les 4campagnes de mesures, àdifférentes profondeurs. Lesvaleurs représentent lesmoyennes  $\pm$  écart-type calculées àpartir des 5 points de contrôle.

<u>Densité apparente (da).</u> A T0, les da étaient en moyenne comprises entre 1,12 et 1,60 (Tab. 4). Les valeurs les plus faibles étaient en surface (0-5 cm) comme cela

est classiquement observé. A T1, les DA étaient en moyenne comprises entre 1,1 et 1,59. A T2 et T3 encore, les DA étaient en moyenne comprises entre 1,15 et 1,59.

Finalement, bien que nous observons toujours un gradient croissant de la da en progressant vers la profondeur, nous n'observons aucun changement notable de DA d'une campagne de mesure à l'autre comme le montre la figure 28. Quelle que soit la densité initiale, nous n'observons pas de changement entre T0 et T1. Il en

va de même pour les inventaires ultérieurs.

Fig. 28. Densité apparente à T1 (après défriche), relativement à la densité apparente précédente initiale T0. La ligne matérialise des densités apparentes égales entre Tx en abscisse et Tx+1 en ordonnée.



Vitesse d'infiltration de l'eau. A T0, la vitesse

d'infiltration moyenne était de 30 cm/h (Fig. 29). A T1, c'est-à-dire 4 mois après la fin de la préparation de la parcelle, cette vitesse n'a guère évolué que ce soit en valeur moyenne (32 cm/h) ou valeur médiane. A noter que la valeur moyenne relevée dans les lignes tracées par le passage du ripper (pseudo sous-solage) est sensiblement supérieure à celle relevée entre les lignes et recouvertes par le broyat des rémanents de défriche. A T2, les valeurs sont très élevées (330 cm/h). Toutefois, nous n'excluons pas des artefacts de mesure. En effet, ce relevé a été réalisé avec des étudiants dans le cadre d'un module d'enseignement. Cet aspect nous incite à ne pas considérer ces valeurs. A T3, soit 2 ans après la fin de la préparation de la

parcelle, la valeur moyenne d'infiltration reste sensiblement la même avec 38 cm/h. Néanmoins, la valeur moyenne d'infiltration est plus élevée sous couvert de *S. guianensis* (47 cm/h) que sous le couvert de rémanents broyés (mulch; 23 cm/h).

Fig. 29. Vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol de surface à T0, T1, T2 et T3, et suivant les différents états de surface (Mulch ou ripper ; couvert herbacé de S. guianensis ou mulch). Les croix rouges indiquent les valeurs moyennes.



#### Discussion.

Absence de compaction en surface juste après la défriche. Nous avions supposé que la défriche mécanisée alternative provoquerait une compaction du sol maximale en surface sur le court terme, c'est-à-dire à la fin de la défriche. Nos résultats ne valident pas cette hypothèse puisque nous observons qu'après la défriche (T1), la DA initiale n'a pas évolué et ceci à toutes les profondeurs analysées. Il est utile ici de préciser que ce sont les mêmes engins qui ont été utilisés pour Régina et pour Paracou. En revanche, la préparation de Paracou a bien été réalisée en pleine saison sèche, ce qui n'a pas été toujours le cas à Regina. Est-ce un résultat inattendu ? Peut-être pas.

En effet, la densité apparente moyenne à Paracou est initialement assez importante, comprise entre 1,1 et 1,6, plus souvent à 1,5. Est-ce une densité encore sensible pour le passage des engins ? A Regina, nous avons vu que les sols de surfaces, mais aussi les moins denses réagissaient le plus au passage des engins, mais les densités initiales étaient bien plus basses qu'à Paracou. Nous avons aussi remarqué qu'à Regina, les éléments grossiers (EG) très nombreux « densifiaient artificiellement » les sols de ce site. En effet, le retrait de cette part d'EG permettait d'accéder à la densité de la terre fine uniquement : 0,9 au lieu de 1,38 ! Ainsi, les EG, denses (2,7) et non poreux, sont immergés dans une matrice de terre fine très aérée qui a absorbé toute la pression occasionnée par les engins en se densifiant d'environ 0,2. Mais cette terre fine avait une densité initiale très basse. A Paracou, la part d'EG est tout à fait négligeable (~ 5,4 % en volume moyen) et la densité apparente des parts de sol collectées reflète quasiment directement la densité de la terre fine. Celle-ci est déjà très dense et elle ne subit pas de modifications notables dans les conditions de pluviométrie très faibles du moment.

De plus, nous avons trouvé aussi que l'absence de compaction du sol en surface a été accompagnée d'une absence de perte des capacités d'infiltration, avec une vitesse d'infiltration qui s'est maintenue autour de 20 cm/h (valeur médiane) ou autour de 30 cm/h (valeur moyenne) entre l'état initial sous couvert forestier (T0) et après la défriche (T1). Cette conservation des capacité d'infiltration montre que la porosité du sol a vraisemblablement subi peu de modifications entre T0 et T1. Il est utile ici de préciser que les rémanents de défriche constituaient une couche épaisse et qu'ils ont constitué une protection efficace de la couche de sol de surface.

Enfin, les travaux ont été entièrement réalisés en grande saison sèche et la défriche n'a eu à subir aucun retard préjudiciable : un temps bien sec donc en septembre et octobre 2018 (< 40 mm sur la période !).

**Densité apparente et impact potentiel sur la croissance racinaire.** Néanmoins, cette apparente insensibilité du sol à la préparation mécanisée ne doit pas faire oublier sa forte densité initiale du sol. La parcelle FTC2 de Paracou occupe l'empreinte d'une ancienne plantation datant de 1990. Cette précédente préparation a bien pu compacter les sols de manière conséquente. La compaction du sol est perceptible sur plusieurs années, voire dizaines d'années (Kozlowski 1999 ; Page-Dumroese et al., 2006). Ses conséquences sur la végétation à l'échelle de l'arbre sont une limitation de la croissance racinaire (Daddow et Warrington, 1983), plus particulièrement quand la DA dépasse une valeur seuil (« Growthlimiting bulk density»). Par exemple, les sols les plus riches en argiles sont considérés comme impactant sérieusement la croissance racinaire à partir d'une DA de 1,4. En revanche, les sols les plus sableux ne le sont qu'à partir d'une DA de 1,75. Finalement, la présence croissante de sable repousse le seuil de compaction vers des valeurs plus hautes. A Paracou, la variabilité granulométrique des sols repose exclusivement sur les quantités d'argile et de sable, les % de limons variant très peu. Ainsi, le % d'argiles ou de sables peuvent être mis en vis-à-vis du seuil de DA limitant la croissance racinaire (DA<sub>GL</sub>). Les graphes de la figure 31 présentent les valeurs de DA en fonction de la teneur en argile susceptible de faire varier l'impact de la DA sur le développement racinaire. A Paracou, que ce soit sans exclusion des rares EG (figure suivante ; à gauche), ou bien avec exclusion des EG (à droite), beaucoup de valeurs de DA approchent la DA<sub>GL</sub> tracée en rouge.



Fig. 31. Evolution de la densité du sol sur la parcelle de Paracou

Un sol avec beaucoup de sables grossiers. D'une manière générale, les sols de Paracou renferment une part très importante de sables grossiers < 50% sur la totalité du profil de 0 à 10 cm. Cette dominance des sables grossiers est connue pour affecter la croissance des racines, mais aussi et surtout les réserves en eau du sol. Avec de telles quantité de sables grossiers, les plantes sont plus exposées au stress hydrique que sur la parcelle de Regina. Finalement, même avec de très faibles quantités d'EG grossiers, les sols de Paracou sont des sols bien moins intéressants que ceux de Régina à plusieurs égards : une densité importante et une fertilité hydrique moindre en grande saison sèche.

## Le site de Cacao.

<u>Situation topographique</u>. La parcelle rectangulaire est située sur un haut de pente et son plus grand côté longe la ligne de crête, ainsi que la piste d'accès (ligne rouge ; Fig. 32). Cette parcelle se trouve aussi sur paysage constitué de collines basses et de larges vallées. D'après la carte topographique, son altitude est comprise entre

30 et 40 m, tandis que les basfonds inondables qui l'entourent, boisés d'*Euterpe oleracea* (palmier Pinot), sont à une altitude d'environ 10 m.

Fig. 32. Situation de la parcelle de Cacao. La ligne rouge indique la piste d'accès au sommet de la colline et à la parcelle entourée de sa zone tampon. Les lignes bleues limitent la desserte agricole.



<u>Protocole d'étude des propriétés physicochimiques des sols.</u> Avant défriche (T<sub>0</sub>), 5 points de contrôle permanents ont été positionnés (Phys 1 à 5 ; Fig. 33). Deux points de contrôle ont été déplacés lors de l'inventaire T1 : Phys 2 devenu Phys 2'



et Phys3 devenu Phys3bis. Un dernier point de contrôle, témoin (Phys 6), a été rajouté en dehors de la parcelle sous couvert forestier.

Fig. 33. Localisation des 6 points de contrôle (Phys 1 à 6) et de la fosse pédologique sur la parcelle de Cacao.

Trois campagnes de mesure des propriétés physicochimiques des sols ont été réalisées (Fig. 34) : (i) la première en septembre 2017 ( $T_0$ ; « grande saison sèche ») quand le couvert forestier initial était encore présent ; (ii) la deuxième en janvier 2019 ( $T_1$ ; « petite saison sèche »), un an après le début de la défriche, et (iii) la dernière en septembre 2019 ( $T_2$ ; « grande saison sèche »), 16 mois après la plantation.

<u>Fig. 34. Pluviométrie et</u> <u>calendrier des relevés</u> <u>pédologiques sur la parcelle</u> <u>de Cacao.</u>





l'eau dans le sol, (ii) la densité apparente, et (iii) nous avons prélevé des échantillons en vue d'analyses granulométriques et chimiques au laboratoire au voisinage immédiat de chacun des 5 points de contrôle (Phys1 à Phys5). Les différentes méthodes sont identiques à celles mises en œuvre sur le site de Regina.

# Résultats.

Evolution de la surface de la parcelle. A T0, la parcelle était intégralement recouverte de forêt naturelle. A T1, soit plus d'un an plus tard, la surface de la parcelle était très irrégulièrement recouverte de mulch, de nombreux endroits ayant une surface nue. Les quantités de mulch sont très réduites, négligeables. Çà et là, des graminées ont pu s'installer. A T2, tout le dispositif est recouvert de végétation variable selon les endroits : soit à dominante herbacée graminées dans la partie est, soit à dominante ligneuse dans la partie ouest. Sur les parcelles semées, le couvert herbacé bien développé est principalement constitué par *Stylosanthes guianensis* qui reste toujours l'espèce la plus tardive, mais qui supplante toutes les espèces semées au même moment.

# Description synthétique du profil de sol (Fig. 35).

Horizon 1 [0 - 5 cm] Sec. Absence de taches. Argilo (-sableux). Structure polyédrique subanguleuse (autour des racines fines) juxtaposée à une structure particulaire. Très poreux. Racines très nombreuses, majoritairement fines, puis moyennes. Absence d'éléments grossiers.

Horizon 2 [5-25/35 cm] Sec à Frais. Taches (voire plage de couleur) dans la partie supérieure [5-15 cm] de cet horizon, nombreuses, moyennes, limites très nettes, très contrastées, en remplissage de fissures qui correspondent parfois à des galeries de vers de terre. Absence de taches dans la partie inférieure de l'horizon.



0

10

20

30

40

50

60

70

80

90

100

110

120

Profondeur en cm

Argilo (-sableux). Structure polyédrique sub-anguleuse. Poreux. Racines nombreuses majoritairement fines puis moyennes. Absence d'éléments grossiers. Nombreuses traces de vers de terre. Nombreux charbons de bois, majoritairement de 5 mm, rarement 10 mm.

Horizon 3 [25/35 – 80/90 cm] Frais. Absence de taches. Argileux. Structure microagrégée, et sur-structure polyédrique sub-anguleuse. Poreux. Racines peu nombreuses, fines, puis moyenne, puis grosses. 2% en volume de graviers de lithoreliques, arrondis et de graviers de quartz, irréguliers émoussés. Présence de vers de terre vers 40 puis 50 cm de profondeur et d'un charbon de bois de 10 mm vers 40 cm de profondeur.

Fig. 35. Profil pédologique dans la fosse creusée en septembre 2017 en sommet de colline sur le site de Cacao © V. Freycon.

Horizon 4 [80/90 - 120 cm] Frais. Absence de taches. Argileux. Structure polyédrique sub-anguleuse et sousstructure microagrégée, Peu poreux. Racines peu nombreuses, fines. 40% de cailloux et pierres de lithoreliques ferruginisées, irréguliers anguleux. 2% de cailloux noirs, allongés émoussés.

La texture est homogène, principalement argileuse. L'horizon 2 a une forte activité de la macrofaune (vers de terre, ...), certainement à l'origine des taches 10YR4/4 (darkyellowishbrown) au sein de la matrice 7.5YR 5/6 (strongbrown). Cet horizon renferme aussi de nombreux charbons de bois  $\rightarrow$  ancienne occupation humaine? L'horizon 3 présente une structure microagrégée forte  $\rightarrow$  horizon Ferralic. Variation progressive de la couleur vers le rouge avec la profondeur. Proposition : Ferralsol.

Fig. 36. Vue synthétique du profil.

Prof.	$\mathbf{p}\mathbf{H}_{eau}$	Corg	N total	C/N	P (a)	CEC (b)	Ca <sup>2+</sup>	$Mg^{2+}$	<b>K</b> +	Na+	TS
cm		%	‰		mg.kg <sup>-1</sup>		me	/100g			%
0-5 cm	4,05	5	3,26	15,20	2,3	16,4	0,58	0,84	0,09	0,10	9,8
$15~{ m cm}$	4,3	2,7	2	13,71	<ld< td=""><td>10,7</td><td>0,19</td><td>0,22</td><td>0,03</td><td>0,05</td><td>4,5</td></ld<>	10,7	0,19	0,22	0,03	0,05	4,5
$25~{ m cm}$	4,7	1,5	1,1	13,68	<ld< td=""><td>8,6</td><td>0,27</td><td>0,13</td><td>0,01</td><td>0,03</td><td>5,2</td></ld<>	8,6	0,27	0,13	0,01	0,03	5,2
60 cm	4,7	0,6	0,5	11,99	<ld< td=""><td>5,8</td><td>0,15</td><td>0,06</td><td>0,03</td><td>0,04</td><td>4,8</td></ld<>	5,8	0,15	0,06	0,03	0,04	4,8
110 cm	4,8	0,45	0,36	12,59	<ld< td=""><td>3,7</td><td>0,14</td><td>0,06</td><td>0,03</td><td>0,03</td><td>7,2</td></ld<>	3,7	0,14	0,06	0,03	0,03	7,2
200 cm	5	0,2	0,14	15,86	<ld< td=""><td>2,8</td><td>0,18</td><td>0,04</td><td>0,02</td><td>0,02</td><td>9,5</td></ld<>	2,8	0,18	0,04	0,02	0,02	9,5

<u>Caractéristiques chimiques</u>. Globalement, les sols sont acides et désaturés (Tab. 5).

Tab. 5. Propriétés chimiques à T0 du profil de sol (fosse en haut de versant de la parcelle). Dosage ICP-AES des cations échangeables (Acétate d'ammonium) + CEC ; <sup>(a)</sup> Dosage par colorimétrie du Phosphore assimilable (Olsen) ;<sup>(b)</sup> Méthode Metson (acétate d'ammonium, pH7). <LD : inférieur à la limite détectable.

Comme observés sur les 2 autres sites, c'est au niveau de la couche de sol de surface (0-10 cm) que les valeurs de MO, de C et de N sont les plus élevées (Fig. 36). C'est aussi au niveau de cette couche de surface que les valeurs de MO, de C et de N connaissent une tendance à l'augmentation de TO (avant défriche) à T1 (après défriche), puis de T1 à T2. A noter que les valeurs de N observées sur ce site sont significativement plus élevées que celles observées à Regina et à Paracou.



Fig. 36. Evolution sur 3 ans des quantités de carbone organique (C %) et d'azote total (N ‰) à différentes profondeurs (0-10, 10-20 et 20-30 cm) pour les 5 points de contrôle Phys au cours des inventaires successifs T0 (09/2017), T1 (04/2019) et T2 (10/2020).

<u>Granulométrie</u>. Au sein de la parcelle, sous couvert forestier (T0), les teneurs en argiles, sables et limons jusqu'à 30 cm de profondeur pour les 6 points de contrôle

(Phys 1 à 6) variaient respectivement entre 36 et 52%, 42 et 51%, et 6 et 14% (Fig. 37).

Fig. 37. Triangle des textures pour les sols des points de contrôle (Phys 1 à 6 ; 0-30 cm) de la parcelle de Cacao.

Le détail du partitionnement granulométrique (Fig. 38) montre que la fraction des sables grossiers est bien plus basse qu'à Paracou, comprise entre 30 et 40%. Cette fraction diminue sensiblement



avec la profondeur, passant graduellement de 38% en surface à 34% à 25 cm, tandis que la fraction des argiles connait l'évolution inverse. Les autres composants (limons et sables fins) ont des quantités stables.



Fig. 38. Parts des différents composants granulométriques en fonction de la profondeur pour les sols de surface (0-30cm) pour les 6 points de contrôle de la parcelle de Cacao.

<u>Densité apparente (da).</u> A T0, les DA étaient en moyenne comprises entre 0,8 et 1,04 (Tab.. 6), valeurs qui révèlent des sols très peu denses, les valeurs les plus faibles étant classiquement observé (0-5 cm). A T1, les DA étaient en moyenne comprises entre 0,8 et 1,23. A T2, les DA étaient en moyenne comprises entre 0,9 et 1,16. Nous observons toujours un gradient croissant de la DA en progressant vers la profondeur, une légère augmentation de DA entre T0 et T1, mais aucun changement entre T1 et T2.

Tab. 6. Evolution de la densité apparente moyenne durant les 3 campagnes de mesures, à différentes profondeurs. Les valeurs représentent les moyennes  $\pm$  écart-type calculées à partir des 5 points de contrôle.

A T1, les da sont significativement plus élevées qu'à T0 entre 10 et 30 cm de profondeur, et cette augmentation est d'environ 0,2 (Tab. 6). En revanche, de 0 à 5 cm de

Profondeur	T0	T1	T2	Moy
$0-5~\mathrm{cm}$	$0,80\pm0,1$	0,79±0,08	$0,92\pm0,1$	0,84
$5\text{-}10~\mathrm{cm}$	0,93±0,07	1,07±0,13	1,02±0,11	1,01
$10-15~\mathrm{cm}$	0,96±0,06	$1,15\pm0,07$	1,12±0,13	1,08
$15-20~\mathrm{cm}$	$0,99{\pm}0,1$	1,19±0,06	$1,15\pm0,07$	1,11
$20-25~\mathrm{cm}$	$1,03\pm0,07$	1,23±0,06	1,12±0,09	1,13
$25-30~\mathrm{cm}$	1,04±0,08	1,23±0,06	1,16±0,03	1,14
Moy	0,96	1,11	1,08	1,05

profondeur, l'augmentation de da n'est pas observée, et entre 5 et 10 cm, elle ne dépasse pas 0,1. Ce sont les valeurs de da initialement les plus fortes qui ont subi une augmentation significative (Fig. 39), tandis que les valeurs initialement les plus faibles n'ont pas subi de modifications notables.

A T2, les da sont toujours plus élevées qu'à T0 entre 10 et 30 cm de profondeur, mais les différences sont moins significatives. Nous observons plutôt une tendance à la diminution entre T1 et T2. En revanche, de 0 à 5 cm de profondeur, une augmentation de da est observée et entre 5 et 10 cm mais elle ne dépasse pas 0,1. Ainsi, ce sont les valeurs de da initialement les plus faibles qui ont subi une augmentation sensible (Fig. 39), tandis que les valeurs initialement les plus fortes montrent une tendance inverse.



Fig. 39. Densité apparente à T1 (après défriche) et à T2 (23 mois après la fin de la préparation de la parcelle), relativement à la densité apparente précédente initiale : T0-T1 (à gauche), T1-T2 (à droite). La ligne matérialise des densités apparentes égales entre Tx en abscisse et Tx+1 en ordonnée.



Fig. 40. Box plots de la densité relevée à différents inventaires à différentes profondeurs. En rouge : moyenne  $\pm$  erreur standard.

<u>Vitesse d'infiltration de l'eau.</u> Bien que les box plots n'aient pas de médianes significativement différentes, nous pouvons formuler quelques commentaires. A T0, sous couvert forestier, les valeurs d'infiltration avoisinent les 100 cm/h avec un coefficient de variation relativement bas de 68 (Fig. 41). En revanche, à TI, ce coefficient de variation est bien plus élevé (129) et les valeurs bien plus dispersées. Néanmoins, c'est à T1 que nous avons observé les valeurs d'infiltration les plus basses indiquant un sol quasiment imperméable sous mulch (< 1cm/h). Mais nous

observons aussi des valeurs bien plus hautes. Cette même dispersion est aussi observée dans les lignes de ripper, mais les valeurs sont sensiblement plus importantes, signe que l'opération de sous-solage a décompacté le sol. A T2, nous observons que la plupart des valeurs sont entre 40 et 150 cm/h mais il est possible de relever ponctuellement des valeurs assez importantes.

Fig. 41. Vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol de surface à T0, T1 et T2, et suivant les différents états de surface (Mulch ou ripper). Les croix rouges indiquent les valeurs moyennes.



#### Discussion.

Compaction en surface juste après la défriche. Nous avons supposé que la défriche mécanisée mise en œuvre provoquerait une compaction du sol maximale en surface sur le court terme, c'est-à-dire à la fin de la défriche. Nos résultats valident cette hypothèse puisque nous avons montré qu'après la défriche (T1), la compaction a bien eu lieu. Toutefois, elle a été étonnamment moins sévère pour les couches les plus en surface qui avaient les DA initiales les plus faibles, une spécificité de ces couches situées entre 0-10 cm. Ainsi, bien que nous soyons en présence de Ferralsols comme à Regina, les résultats sont différents, d'autant plus que les sols de Cacao sont des sols initialement très peu denses, très aérés et sans éléments grossiers (EG). Il est utile de rappeler qu'à Regina, le délai de relevé des propriétés des sols entre fin de la défriche et T1 a été de seulement 1 mois et sans changement de saisonnalité : la compaction de surface occasionnée par la défriche a été vérifiée en surface. A Cacao, la densification de cette couche a bien dû avoir lieu puisqu'elle est observée plus en profondeur (10-30 cm). Une explication simple est d'une part le délai de 10 mois entre la fin de la phase initiale de la défriche et les relevés T1 des propriétés des sols d'une part, et d'autre part, l'alternance d'une grande saison sèche et d'une petite saison des pluies d'autre part : la saison sèche a pu provoquer le dessèchement et le retrait, voire la fissuration des couches de surface, tandis que la saison humide a provoqué une nouvelle expansion des volumes de sols. Ainsi, la compaction des couches de surface a bien pu se résorber naturellement, tandis que les couches plus profondes moins accessibles, plus protégées ont conservé cette densification qui s'est produite lors de la défriche.

Vitesses d'infiltration de l'eau. La défriche en saison des pluies aurait dû affecter les vitesses d'infiltration de l'eau qui devraient être très basses à T1 comme nous l'avons observé à Regina. Mais il n'en est rien. En effet, comme pour la résorption de la densification de surface, le délai de 10 mois associé à une alternance des saisons mais aussi le développement racinaire des plantes, a aussi pu restauré une porosité permissive. Toutefois, nous avons observé à T1, sur 2 points de contrôle, des vitesses d'infiltration très basses (> 1 cm/h) qui témoignent que certaines zones ont tout de même conservé les traces de cette défriche en saison des pluies qui compromettait encore l'absorption de l'eau.

Densité apparente et impact potentiel sur la croissance racinaire. La conséquence d'une forte compaction du sol peut être la limitation de la croissance racinaire (Daddow et Warrington, 1983), plus particulièrement quand la DA dépasse une valeur seuil (« Growth-limiting bulk density ») qui peut être représentée (Fig. 42). A cacao comme sur les autres sites, la variabilité granulométrique des sols repose exclusivement sur les quantités d'argile et de sable, les % de limons variant très peu. Ainsi, le % d'argiles ou de sables peut être mis en vis-à-vis du seuil de DA limitant la croissance racinaire (DA<sub>GL</sub>). La figure

42 présentent les valeurs de DA en fonction de la teneur en argile susceptible de faire varier l'impact de la DA sur le développement racinaire. A Cacao, que ce soit sans exclusion des rares EG, ou bien avec exclusion des EG négligeables (0,6 %), toutes les valeurs de densité apparente sont très en deçà de ces valeurs de DA<sub>GL</sub> tracée en rouge.



<u>Fig. 42. Evolution de la densité du</u> <u>sol sur la parcelle de Cacao</u>

Comme décrit précédemment, la défriche du site de Cacao a été bien plus longue que celle réalisée sur les 2 autres sites puisqu'elle a duré une année. Elle a aussi été réalisée sans considération de la saisonnalité,

certaines opérations ayant été réalisées en pleine saison des pluies. Enfin, l'outillage utilisé était différent, exclusivement constitué d'engins à chenilles moins impactant que des engins à roues.

Autre élément, important, les quantités de mulch issues du broyage des rémanents étaient bien moins importantes que celles mesurées sur les 2 autres parcelles Regina et Paracou. En effet, le débardage des gros bois a entrainé beaucoup de rémanents, tandis que les plus petits n'ont été broyées que 12 mois après le début de la défriche. Ainsi, on peut penser qu'une bonne partie des plus petits rémanents étaient déjà décomposés en raison de conditions très propices à ce phénomène (chaleur, humidité).

#### Descriptions supplémentaires de sols sur d'anciennes plantations

Durant le temps du projet, nous avons souhaité répondre à une série de questions concernant la variabilité de croissance observée chez quelques espèces (Wana Kouali *Vochysia tomentosa*; *Niangon*; *Bagasse*) croissant sur d'anciennes plantations guyanaises (essai d'essences locales de Paracou; Tonnegrande; Arboretum de l'Egyptienne; Piste Christine; Montagne de Fer) en privilégiant les propriétés physiques des sols : les éléments édaphiques peuvent-ils expliquer les bonnes performances des Wana Kouali (*Vochysia tomentosa*) sur le site « d'essai d'essences locales de Paracou » (Tab. 7; ++) et les performances moyennes de cette même espèce sur le site de Tonnegrande (Tab. 7; +) ? La même question est posée pour les Niangons plantés sur les sites de Paracou et l'Egyptienne, ainsi que pour les Bagasse plantées sur les sites de Paracou, de Piste Christine et de Montagne de fer (Tab. 7). Pour répondre à ces questions, l'objectif principal a été de caractériser les sols de 6 parcelles de plantations d'arbres en décrivant des profils de sols représentatifs sur ces différentes parcelles et pour lesquelles nous disposions des données de croissance/état sanitaire/dimension des arbres plantés (Nicolini et Morel 2015).

Site (année plantation)	Espèce	Etat arbre	Profondeur	Calc. Tot.	C <sub>org</sub> (%)	C/N	$\mathrm{pH}_{\mathrm{eau}}$	$pH_{\rm KCL}$	А	$\mathbf{LF}$	LG	SF	$\mathbf{SG}$
			0-10	0,21	3,58	15,1	5,96	5,16	23,1	14,2	3	11,7	48
CHR	Dem		10-20	0,21	1,97	12,8			30,8	7,7	3,5	10,8	47,2
(2000)	Бад		50-60	0,21	1,03	3,05			49,7	21,8	3,8	6,8	17,9
			90-100	0,31	0,32	8,3			28,8	44,4	7,6	6,4	12,8
			0-10	0,31	1,50	12,9	4,45	4,06	14,6	6,3	1,6	13,1	<u>64,3</u>
PAR*	Wan		10-20	0,21	1,46	13,3			16,7	5,8	0,8	10,3	<u>66,4</u>
(Jan 1984)	wan	<b>T T</b>	50-60	0,21	0,69	15,8			34,6	5,1	2,1	13,8	44,4
			90-100	0,21	0,55	17,3			42	5,9	3	9,6	40
			0-10	0,21	2,72	20,5	4,71	4,03	16,4	7,8	2,1	14,3	<u>59,4</u>
PAR	Nian	-	10-20	0,21	1,33	14,2			15,3	6,3	1,4	13,3	<u>63,8</u>
(1984)			50-60	0,31	0,55	14,1			32,4	6,7	1,6	13,9	45,3
			90-100	0,31	0,25	13,9			30,4	11,6	2,6	8,5	46,8
DAD*	Bag		20 cm	/					24,7	6,2	2	15,2	51,7
$(M_{0}; 1084)$			50 cm		/	/	/	/	39	4	2	14	45,7
(Mai 1984)			100 cm						31	10	6	12,7	41,5
			0-10	0,31	3,78	15,9	4,59	4,2	18,5	6,7	2,5	45,9	26,3
EGY	Nion	<u>.</u>	10-20	0,21	2,30	14,7			13,8	10,1	3,9	55,3	16,9
(1986)	INIAII	тт	50-60	0,21	0,87	14,9			30,7	5,2	2,5	46,2	15,4
			90-100	0,21	0,60	11,5			33,7	4,4	2,3	47,3	12,3
			0-10	0,31	2,08	12	4,45	4,17	34,1	4,7	1,2	13,6	46,4
MDF	Dag		10-20	0,21	1,23	12,2			43,5	6,8	0,5	13,6	35,7
(2000)	Бад	<b>T T</b>	50-60	0,21	0,52	11,9			51,9	4,8	1,5	11,8	29,9
			90-100	0,21	0,39	10,8			53,9	4,8	0	10,6	30,6
			0-10	0,21	5,14	12,9	5,35	4,53	24,5	23,8	9,2	25,2	17,3
TON	Wan	-	10-20	0,31	2,78	12,2			37,2	20,9	2,1	22,4	17,4
(1978)	wan	т	50-60	0,21	1,28	11,7			62,4	4,8	1,2	19	12,5
			90-100	0,21	0,92	11,3			62,5	5,5	2,3	15,7	14,1

Tab. 7. Propriétés physico-chimiques de sols analysés sur 5 sites de plantation : Piste Christine (CHR), Paracou (PAR ; «essai Niangon » et «essai d'essences locales » \*), Egyptienne (EGY), Montagne de Fer (MDF) et Tonnegrande (TON). Ces sites plus anciens (1984, 2000) et accueillent différentes espèces : des Bagasses (Bag), des Niangons (Nian) et des Wanakouali (Wan ; Vochysia tomentosa) qui ont eu des développements très bons (++), bons (+), médiocres (-) et mauvais (--).

Le profil de sol de **Piste Christine** (CHR ; Fig. 43) est dans une parcelle de Bagasses (Bag) plantées en 2000. Il a les caractéristiques d'un Acrisol. Il est principalement caractérisé par une augmentation importante de la teneur en limons fins dès 50 cm (20 %) et 44% à 90-100 cm de profondeur (Tab. 7) qui suggère au-delà un horizon complètement imperméable et *a priori* très défavorable à l'enracinement (Humbel 1978). Les racines ne sont pas nombreuses sur l'ensemble du profil, quasiment absentes au-delà de 60 cm de profondeur ! Sur ce site, presque toutes les Bagasses âgées de 15 ans dépérissent précocement (DBH moyen : 9 cm à 15 ans), sans avoir atteint la maturité (- - ; Tab. 7).

Le profil de sol de **Montagne de Fer** (MDF ; Fig. 43) est dans une parcelle de Bagasses (Bag) plantées en 2000 qui était à l'origine un ancien abatis clandestin et parfois encombré de gros bois. Il a les caractéristiques d'un Ferralsol (Tab. 7). De nombreuses racines sont nombreuses et visibles sur la totalité du profil. Le rapport C/N de 12 traduit une minéralisation relativement rapide. Sur ce site, les Bagasses se développent très bien avec un DBH moyen de 18 cm à 15 ans (++ ; Tab. 7).



Fig. 43. Profils de sol dans 2 placettes de Bagasses : Piste Christine (à gauche) et Montagne de Fer (à droite). Les 2 fosses ont la même profondeur Noter la très faible présence de racines sur le profil de gauche et leur abondance sur le profil de droite © V. Freycon.

A ces 2 profils plantés de Bagasses, nous rajoutons les résultats d'une 3<sup>ème</sup> placette plantée de Bagasses en mai 1984 (PAR; Tab. 7) et appartenant à « l'essai d'essences locales » de **Paracou**. Ces résultats sont rapportés par Freycon & Roelens (2006) dans une étude de la relation entre le modelé topographique et la structure des sols sur ce dispositif (Fig. 44). L'organisation des sols est cohérente avec la topographie. Les parcelles du sud du dispositif (1, 3, 4, 5, 6, 8 et 9), situées sur le plateau (Fig. 44 et 45), ont des caractéristiques typiques de sols sur substrat granitique : pas d'éléments grossiers, une teneur en argile plus faible que la moyenne à 20 cm de profondeur (et en parallèle une teneur en sables plus faible) et une teneur en limons qui reste faible à 100 cm de profondeur (Fig. 44 ; graphe de gauche). En revanche, les parcelles du nord du dispositif (13, 14, 15 et 16), situées en bordure du plateau, ont des sols qui changent : riches en éléments grossiers, elles ont aussi une teneur en argile plus forte que la moyenne à 20 cm de profondeur (et une teneur en sables plus faible) et une teneur en limons qui augmente à 100 cm de profondeur. Ces auteurs rapportent aussi, parmi ces parcelles, la particularité de la parcelle 13 avec la plus forte teneur en limons à 100 cm de profondeur et qui présente le plus nettement des traces d'hydromorphie. La placette de Bagasse qui nous intéresse n'a pas été décrite par Freycon et Roelens, mais elle est aussi située à un niveau bas sur la pente, à un peu plus d'une vingtaine de mètres de la placette 13. La placette de Bagasses ont disparu. Seules les bagasses situées en bas de pente ont survécu et ont pu atteindre des diamètres intéressants (> 30 cm). N'ayant pas plus d'observations concernant les sols pour cette placette de Bagasses, nous avons établi une valeur moyenne (Tab. 7) pour chaque constituant (A, LF, LG, SF et SG) et pour les 3 profondeurs (20, 50 et 100 cm) à partir des valeurs des placettes Nord (13, 14, 15 et 16).



Fig. 44. Teneur en argile et en limons (graphe de gauche) des placettes du dispositif d'essences locales (à droite). Les placettes qui ont fait l'objet des analyses de Freycon et Roelens (2006) sont numérotées de 1 à 16. Le tableau au milieu présente la place respective des taxons sur le dispositif. La ligne en pointillé sur le dispositif (à droite) localise la rupture de pente. La placette de Bagasses est à droite de la placette 14.

Fig. 45. Profil altimétrique Nord-Sud sur l'essai d'essences locales de Paracou.





Fig. 46. Profils de sol dans 2 placettes de Wanakoualis : sites de Paracou (à gauche) et de Tonnegrande (à droite). Les 2 fosses ont la même profondeur © V. Freycon.

Le profil de sol de **Paracou** (PAR ; Fig. 46) est dans une parcelle de Wanakouali (*Vochysia tomentosa* ; Wan) plantés en 1984 dans « l'essai d'essences locales » du CIRAD. Il a les caractéristiques d'un Acrisol rajeuni par l'érosion (granite altéré à 20 cm de profondeur), un critère favorable pour la nutrition des arbres. Le cycle de la matière organique en surface semble être bon avec de nombreuses traces d'activité de la macrofaune du sol et un rapport C/N relativement bas (=13) qui traduit une minéralisation assez rapide de la matière organique. En revanche, les sables grossiers (SB > 60% ; Tab. 7) sont relativement abondants dans les 20 premiers cm de sol, et les éléments grossiers sont bien présents (30-35% du volume), tous réduisant la réserve en eau du sol. Sur ce site, les WanaKouali sont bien développés (DBH moyen : 34 cm à 30 ans), en très bon état sanitaire et constituent une canopée fermée (++ ; Tab. 7).

Le profil de sol de **Tonnegrande** (TON ; Fig. 46) est dans une parcelle de <u>Wanakouali (Wan</u>) plantés en 1978. Il a les caractéristiques d'un Acrisol avec un relativement bon drainage de type Alt (drainage vertical ralenti) et d'un Plinthosol (abondance d'éléments grossiers). Le cycle de la matière organique en surface semble être correct avec des traces d'activité de la macrofaune du sol et un rapport C/N=13. Ce profil a la particularité d'avoir une teneur en limons fins élevée (= 24 % ; Tab. 7) à 0-20 cm de profondeur que nous n'avions pas perçue sur lors du diagnostic terrain ! Les éléments grossiers très abondants (> 45% du volume) à

partir de 40 cm de profond réduisent la réserve en eau du sol, même s'ils ne semblent pas être une contrainte pour l'enracinement qui est encore bien présent à 100 cm de profondeur. Cette abondance d'éléments grossiers suggère la présence en profondeur d'une cuirasse massive qui elle, pourrait être une forte contrainte pour l'enracinement. Sur ce site, les Wana Kouali sont moyennement développés (Tab.7; +) avec un DBH moyen de 27 cm à 36 ans et constituent une canopée fermée, mélangée avec le recru natif, signe d'une mortalité qui a été importante dans les premières années de la plantation (absence d'entretien).



Fig. 47. Profils de sol dans 2 placettes de Niangons : sites de Paracou (à gauche) et de L'Egyptienne (à droite) © V. Freycon.

Le profil de sol de **Paracou** (PAR ; Fig. 47) est dans une ancienne parcelle de <u>Niangons</u> (Nian) plantés en 1984. Il a les caractéristiques d'un Acrisol. Le cycle de la matière organique en surface ne semble pas être optimal avec peu de traces d'activité de la macrofaune du sol et un rapport C/N élevé (=20) qui traduit une minéralisation lente de la matière organique ! Les éléments grossiers relativement abondants (20-30% du volume) réduisent la réserve en eau du sol de la même manière que les sables grossiers très abondants entre 0 et 20 cm de profondeur (SB > 60% ; Tab. 7). Par ailleurs, une augmentation sensible de la teneur en limons fins à 90-100 cm de profondeur (11,6%) suggère un horizon davantage imperméable au-delà et *a priori* peu favorable à l'enracinement (Humbel 1978). D'ailleurs dans l'horizon 4 [60 - 110 cm], les racines, peu nombreuses et fines (< 2 mm) en haut de l'horizon, sont absentes en bas de l'horizon. Sur ce site, de nombreux arbres adultes dépérissent et meurent, mais après avoir atteint le stade de la maturité et de la

fructification au sein d'un peuplement âgé de 30 ans et dont le DBH moyen est 28 cm (- ; Tab. 7).

Le profil de sol de **L'Egyptienne** (EGY ; Fig. 47) est dans une ancienne parcelle de <u>Niangons</u> plantés en 1986. Il a les caractéristiques d'un Acrisol avec un relativement bon drainage (Alt : drainage vertical ralenti). Le cycle de la matière organique en surface semble être bon avec de nombreuses traces d'activité de la macrofaune du sol et un rapport C/N de 15. L'absence d'éléments grossiers et une texture équilibrée sans défaut visibles lui confère certainement une bonne réserve en eau du sol. Les racines sont nombreuses sur la totalité du profil. Sur ce site, les Niangons sont très bien développés (DBH moyen : 34 cm à 28 ans) et constituent une canopée pure et fermée (++ ; Tab. 7).

# 4 – Synthèse générale.

Au terme de ce chapitre, il est possible maintenant de tirer les enseignements de cette expérimentation sur les 3 sites plantés pour ce qui concerne la nature et l'évolution des sols étudiés dans ce projet.

# Des sols de structures variables avec des fertilités très différentes.

Les sols des 2 sites les plus à l'Est, Regina et Cacao, sont des Ferralsols, tandis que le sol du site choisi à Paracou et plus proche du littoral est un Acrisol.



Fig. 47. Graphe synthétique de la structure physique des sols observés dans les couches 0-30 cm. Un volume connu de sol, prélevé de manière à préserver son intégrité structurelle, puis séché de manière à ne plus contenir d'eau (anhydre), est constitué de terre fine TF (argiles A + limons fins et grossiers L + sables fins SF + sables grossiers SG), d'éléments grossiers EG (cailloux, pisolithes, autres) et d'air. L'air remplit tous les espaces vides de la terre fine, tandis que les éléments grossiers EG sont généralement pleins, ne pouvant contenir ni air, ni eau. Les Ferralsols, d'abord observés sous forêt naturelle, de densité apparente (da) assez basse (da<sub>terrre fine</sub> à 0-30 cm ~ 0,9-0,96) sont très aérés (Fig. 47 ; Cacao : 3 vol.<sub>vide</sub> pour 2 vol.<sub>terre fine</sub> ; Regina : 2 vol.<sub>vide</sub> pour 1 vol.<sub>terre fine</sub>), et se démarquent beaucoup de l'Acrisol anthropisé, bien moins aéré (1 vol.<sub>vide</sub> pour 1 vol.<sub>terre fine</sub>) et dont la densité apparente est bien plus haute (da<sub>terrre fine</sub> à 0-30 cm ~1,46).



Fig. 48. Graphe synthétique de la granulométrie des sols observés dans les couches 0-30 cm. Un poids de sol est prélevé sans considération de son intégrité structurelle, puis trier pour en retirer tous les éléments grossiers (EG) et séché de manière à ne plus contenir d'eau (anhydre). Après traitement, il ne reste que la terre fine TF constituée d'argiles, de limons fins et de limons grossiers, de sables fins et de sables grossiers. C'est cette terre fine qui contiendra les éléments minéraux.

A 0-30 cm de profondeur, les Ferralsols de notre étude sont aussi bien plus argileux (Fig. 48 ; 40%), bien moins sableux (35% à 45%) que l'Acrisol anthropisé qui totalise au plus 30% d'argiles pour 70% de sables (dont plus de 50% de sables grossiers).

Ces grands écarts structuraux entre Ferralsols et Acrisols sont associés à de grands écarts en matière de rétention d'eau (Ferralsols > Acrisol), mais aussi en matière de rétention des différents cations (Capacité d'Echange Cathionique;  $CEC_{Ferralsols} >> CEC_{Acrisol}$ ; Tab. 1, 3 et 5) et donc à des écarts chimiques notables.

En revanche, ce sont les Ferralsols, plus riches en argiles, qui montrent les plus basses valeurs de P disponible (< à la limite détectable ; Tab. 1 et 5), tandis que l'Acrisol montre des valeurs mesurables (Tab. 3). En effet, l'oxyde de fer mobilise la quasi-totalité du P disponible dans les sols riches en argiles (Ferralsols), ce qui n'est pas le cas des sols plus sableux comme l'est notre Acrisol anthropisé.

Enfin, les deux Ferralsols renferment 2 fois plus de matière organique, de carbone et d'azote total que l'Acrisol anthropisé à 0-30 cm de profondeur.

En résumé, les 2 Ferralsols observés, sont bien plus fertiles que l'Acrisol anthropisé tant structurellement que chimiquement. Ces différences que nous mettons en évidence vont dans le même sens que celles décrites en 2016 par Guitet *et al.* (S.

Guitet, V. Freycon, O. Brunaux, R. Pélissier, D. Sabatier and P. Couteron (2016). Geomorphic control of rain-forest floristic composition in French Guiana: more than a soil filtering effect? Journal of Tropical. Ecology, 32, pp 22-40).

Quelques différences notables existent toutefois entre les 2 Ferralsols étudiés. Le sol de surface (0-30 cm) observé à Regina renferme une grande quantité d'éléments grossiers (EG : pisolithes) qui occupe plus de 30% du volume total de sol (Fig 10), tandis que celui observé à Cacao ne contient quasiment pas d'EG (~ 3% du volume de sol). A Regina, au-delà de 20 cm de profondeur, la quantité d'EG décroit rapidement avec la profondeur. Ainsi, à Regina, la couche de pisolithes de cuirasses, qui impacte de matière notable les réserves en eau du sol de surface, constitue un obstacle non négligeable à l'installation des systèmes racinaires des jeunes végétaux plantés ou issus de graines. Cette couche de pisolithes peut constituer un début d'explication (1) à l'installation lente du recru natif sur cette parcelle de Regina et à son entretien essentiellement manuel qui n'a jamais posé de problèmes majeurs (voir « chapitre 3 »), mais aussi (2) à l'échec de l'installation d'une espèce plantée n'ayant pas reçu de fertilisant à la plantation (voir « chapitre 5 »).

Par ailleurs, les sols observés sur la parcelle de Regina montrent une grande variabilité structurale évidente qui s'exprime avec la pente : les sols de milieu de pente sont bien plus sableux (56% ; dont 45% de SG) que ceux de sommet de pente (34% ; dont 25% de SG). A Regina, cette variabilité avec la pente peut aussi constituer un début d'explication à la variabilité de croissance et de mortalité de 2 espèces plantés sur la parcelle (voir « chapitre 5 »). D'un point de vue granulométrique, les sols de la parcelle de Cacao sont bien moins variables.

Enfin, Il est utile de souligner que les certaines des espèces choisies ont été plantées sur des sols de structures très diverses, et avec des réussites très diverses qui sont commentées dans le chapitre 5 « Croissance des arbres ».

# Des évolutions différentes selon les itinéraires et les états initiaux.

Le retrait du couvert forestier naturel est une opération qui impact le sol que ce soit de manière direct (passage des engins), soit indirect (densification consécutive à la décomposition de la rhizosphère), au travers de divers éléments que sont la densité apparente, la vitesse d'absorption de l'eau, la composition chimique, etc. Cet impact est plus ou moins important, réversible en fonction de différents éléments inhérents à la configuration du sol (profondeur, densité initiale), ou ont trait à l'évolution de la surface du sol (décomposition d'un mulch, installation d'un nouveau couvert).

**Augmentation de la densité des sols de surface**. Dans les 2 cas de retrait du peuplement naturel (Regina et Cacao), les engins sont intervenus sur des sols « vierges », très peu denses qui ont vu augmenté leur densité apparente (da) après passage des engins. Dans les 2 cas, nous avons observé une augmentation moyenne

autour de 0,2. Dans les 2 cas, la défriche a eu lieu soit durant la saison des pluies (Cacao), soit a débordé sur la saison des pluies (Regina). Il faut savoir que la présence de l'eau, l'eau facilite la pénétration des racines ou bien de la sonde d'un pénétromètre en diminuant les résistances de déplacement des particules de sols entre elles. Dès lors, celles-ci peuvent s'agglomérer bien plus facilement. C'est ce qui se produit lors du passage d'un engin lourd sur un sol trop humide. Cette densification, qui n'est autre qu'une compaction, est d'autant plus forte que (1) les da initiales sont basses et que (2) le sol est humide. A Regina, bien que la défriche ait principalement eu lieu en saison sèche, ce sont les dernières opérations (andainage, girobroyage, discage) réalisées sur des sols déjà bien mouillés en surface qui ont compacté le sol, et aussi gravement compromis l'absorption de l'eau dans les premiers mois après la fin de la préparation de la parcelle.

Cela n'a pas été le cas à Paracou, site pour lequel, la défriche a été réalisée intégralement en saison sèche. Mais ce site avait aussi des sols déjà très denses  $(da \pm 1,5)$  avant préparation en juillet 2018 et donc peu sensibles au changement comme nous avons pu le voir à Regina : les densités les plus hautes subissent moins les modifications induites par le passage des engins même en saison des pluies. Ce sol était-il initialement moins dense en 1990, avant retrait du couvert de forêt naturelle ? Nous ne pouvons pas le savoir (sauf en mesurant la densité sur les zones voisines encore couvertes de forêt naturelle), mais l'hypothèse d'une compaction en 1990, lors de la première défriche avant plantation des Acacias, est très vraisemblable. Si la préparation du site de Paracou en 2018 n'a pas fait progressé la densité apparente de l'Acrisols de Paracou, pouvons-nous penser qu'il a atteint sa densité apparente maximale dans la limite d'opérations similaires ? Cela est bien possible. La réalisation de futures opérations similaires sur les Ferralsols de Regina et Cacao fera-t-elle progresser la densité apparente sur ces sites ? Quelle sera la densité apparente « maximale » atteinte sur ces sites dans la limite d'opérations similaires ?

Vitesse d'absorption de l'eau. Cette compaction de surface a un impact sur les capacités d'absorption de l'eau, un paramètre aisé à mesurer, mais aussi très intégrateur. En effet, un sol qui n'absorbe plus ou ne laisse plus l'eau est un sol qui a perdu la plupart de ses propriétés et montrent de nombreux défauts de fonctionnement (hydromorphie, conditions anaérobiques, dénitrification exacerbée et production de  $N_2O$ , etc). A Regina, la réalisation des dernières opérations (andainage, girobroyage, discage) réalisées sur des sols déjà bien mouillés en surface a complètement annihilé les capacités d'absorption de l'eau mesurées juste 2 mois après défriche. Cela n'a pas été le cas des sols de la parcelle de Paracou (préparée en grande saison sèche) qui ont finalement conservé leurs capacités initiales d'absorption de l'eau (mesurées 6 mois après défriche). Etonnamment, sur la parcelle de Cacao qui a été préparée en saison des pluies, les sols ont subi une compaction de surface mais ils ont relativement bien conservé leur capacités initiales d'absorption de l'eau. Toutefois, la mesure des capacités d'absorption de l'eau après défriche (T1) a été réalisée bien après la défriche (10 mois). Durant ce laps de temps, l'alternance de périodes humides et sèches a pu résorber cette compaction de surface et restaurer en partie les capacités d'absorption du sol, sans oublier l'action des végétaux lors de la reprise du recru natif. Ce phénomène de restauration a aussi été observé à Regina au cours des mois qui ont succédé à la défriche et à la plantation.

**Diminution des densités apparentes et restauration des capacités d'absorption de l'eau.** A Regina, la compaction des couches de surface s'est résorbée au travers d'une dé densification consécutive à (1) l'alternance des périodes sèches et humides, (2) de la décomposition du mulch qui a protégé la macrofaune du sol, et (3) le développement racinaire superficielle des végétaux, notamment *Stylosanthes guianensis* qui est connu pour sa capacité à se développer sur des sols compactés et les décompacter grâce à son développement racinaire efficace. Cette dé densification est aussi le siège d'une récupération des capacités d'absorption de l'eau : cette récupération est la plus lente sur les sols nus, puis viennent les sols couverts de mulch, tandis que les récupérations les plus rapides et les plus abouties sont sur des sols couvert de *S. guianensis*. En revanche, plus en profondeur, il n'y a pas de dé densification, signe d'une certaine irréversibilité relative ou bien avec un délai bien plus long de plusieurs années.