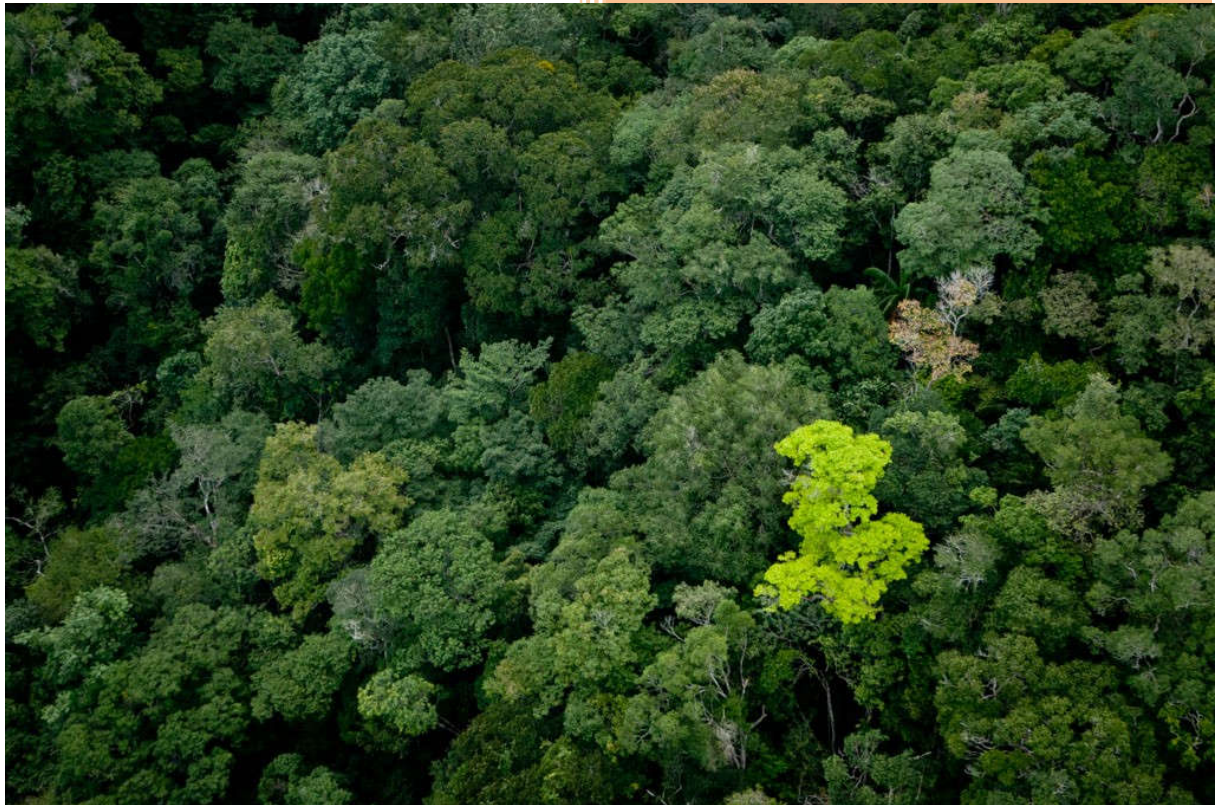


# Etat des lieux sur les stocks et flux de carbone dans le Parc Amazonien de Guyane



## Résumé

Avec des 3,4 Mha, le Parc amazonien de Guyane (PAG) est le plus grand parc de forêt tropicale humide du monde. Il constitue un outil majeur pour la France en termes de conservation des écosystèmes forestiers tropicaux. Son massif forestier peu fragmenté et peu anthropisé rend de nombreux services écosystémiques mais représente aussi un stock important de carbone sur pied. Le déstockage du carbone forestier (aménagement des zones de vie, routes/pistes, orpaillage...) représente des flux d'émissions de GES et un risque d'impact sur le changement climatique local, voir global. C'est pourquoi le Parc détient un rôle important de gardien de ce stock sur pied et en bon état écologique. Il accompagne aussi les communautés de son territoire dans l'aménagement pour répondre à leurs besoins en termes de développement d'activité et de qualité de vie. S'inscrivant dans la mouvance de la transition énergétique à son échelle, le PAG s'est engagé en 2011 dans une politique de gestion éco-responsable puis en 2015-2017 amplifie son exemplarité dans la mise en œuvre de ses actions et chantiers pilote.

La présente étude vise à estimer le bilan carbone issu du secteur des terres (forêt, utilisation des terres et changements d'utilisation des terres) dans le Parc Amazonien de Guyane (PAG). L'analyse des changements d'occupation des sols et des conséquences de ces derniers en termes d'émission des flux carbone et de variation des stocks permet au PAG de connaître sa pression sur le changement climatique et de cibler les marges de manœuvres dont il dispose pour être dans un processus d'amélioration continue et établir son plan d'action opérationnel.

Il s'agit principalement d'estimer le bilan des espaces forestiers, selon qu'ils sont ou non soumis à certaines perturbations naturelles (ex : sécheresse) ou anthropiques (ex : abattis traditionnel, orpaillage, opérations sylvicoles...). L'étude identifie par ailleurs les incertitudes et marges de progrès pour affiner cette évaluation des stocks et flux carbone forestiers.

Dans un premier temps, les stocks typiques de carbone (dans la biomasse et les sols) d'un hectare de forêt amazonienne ont été étudiés d'après la littérature, en cherchant à trouver des études les plus représentatives des conditions du PAG. Il s'agit alors de proposer des fourchettes de stock de C/ha soit pour le PAG dans son ensemble soit pour différentes zones à la végétation ou à la pédologie spécifiques.

Dans un second temps, les situations typiques de cette forêt sont listées dans ce qui est appelé « contexte socio-environnementaux » (CSE). Pour chacun de ces CSE des hypothèses sont dressées, basées autant que possible sur des sources bibliographiques et des dires d'experts, pour calculer l'évolution du stock de carbone initial afin d'en déduire des flux d'émission ou de séquestration. Les situations pour lesquelles des incertitudes majeures persistent sont indiquées et des recommandations sont proposées pour affiner les hypothèses.

Dans un troisième temps, les surfaces moyennes (en ha/an) concernées sont estimées pour les différentes situations, sur une période définie, ce qui permet de proposer une première estimation du bilan possible du secteur des terres du PAG.

La thématique de bilan carbone forestier est particulièrement complexe et fait l'objet de recherches scientifiques intenses pour comprendre les différents phénomènes en jeu. La présente étude reste donc une première approche pour dégrossir le sujet à l'échelle du PAG. Elle vise à être mise en miroir du bilan carbone 2016 de l'établissement et des résultats de l'observatoire carbone de Guyane.

# Sommaire

## Table des matières

<b>1. Synthèse bibliographique .....</b>	<b>1</b>
Situation générale.....	1
Stocks typiques de carbone .....	3
Flux de carbone et bilan carbone.....	4
<b>2. Méthode .....</b>	<b>6</b>
2.1 Méthodes génériques de calcul des stocks et flux carbone.....	6
2.2 Elaboration des contextes socio-environnementaux.....	7
<b>3. Résultats.....</b>	<b>9</b>
3.1 Description des Contextes socio-environnementaux .....	9
3.1.1 CSE 1 : Forêt mature sans récolte .....	9
3.1.2 CSE 2 : Forêt mature avec récoltes .....	14
3.1.3 SCE 3 : Abattis itinérant .....	17
3.1.3.1 SCE 3.1 : Abattis itinérant traditionnel.....	17
3.1.3.2 CSE 3.2 : Abattis itinérant à cycle court .....	21
3.1.4 CSE 4 : Orpillage .....	25
3.1.5 CSE 5 : Déforestation pour mise en culture pérenne.....	28
3.1.6 CSE 6 : Déforestation pour usage non-agricole.....	31
3.2 Synthèse .....	35
<b>5. Recommandations et mise en perspectives .....</b>	<b>36</b>
<b>Annexe 5 : Bibliographie.....</b>	<b>37</b>

# 1. Synthèse bibliographique

## Situation générale

- *Situation du PAG par rapport aux réservoirs de carbone amazoniens*

Le PAG, situé dans la partie Sud de la Guyane, appartient au Plateau des Guyanes. Il constitue une petite partie (0.6% environ) de l'ensemble forestier amazonien. La forêt amazonienne est un réservoir important de carbone. La Guyane française constitue le seul territoire de cet ensemble qui soit intégré aux Pays de l'Annexe I de la CCNUCC.

- *Diversité des espaces dans le PAG*

Le PAG s'étend sur une superficie totale de 3,4 millions d'ha. Il est composé de la « zone de cœur » (2 millions ha), et de la zone de libre adhésion (1,4 million ha) (PAG, 2017). La carte ci-dessous présente l'organisation territoriale du PAG.

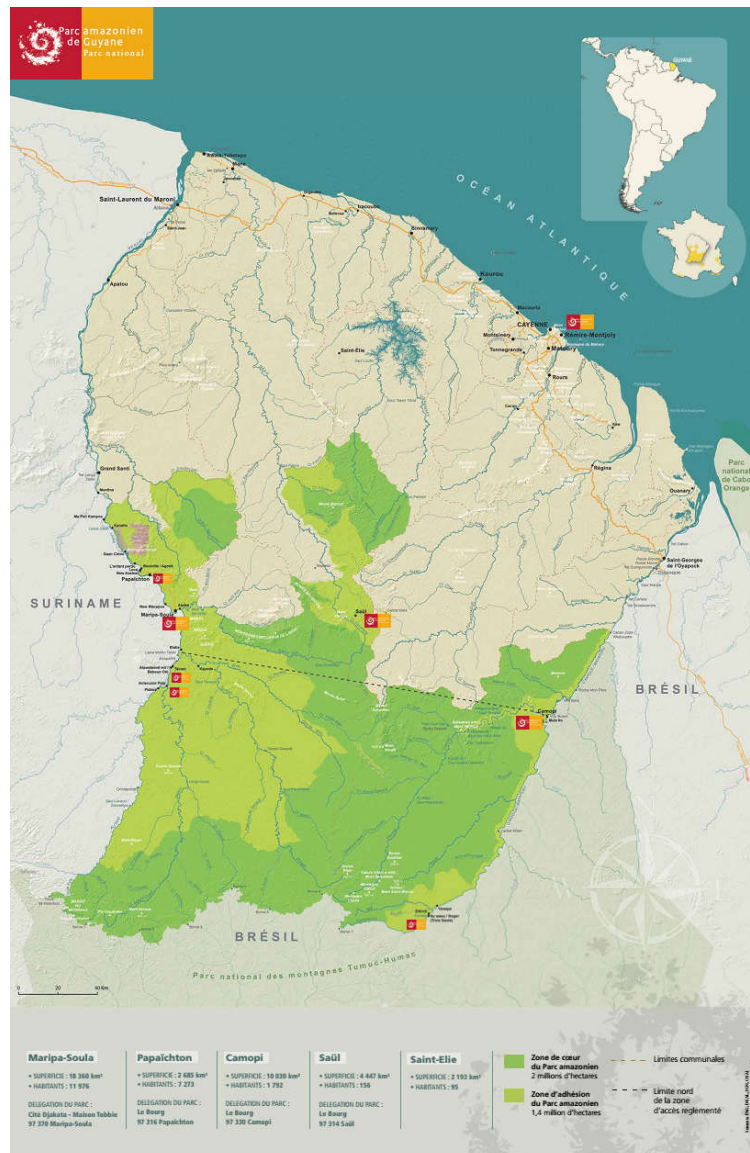


Figure 1 : carte générale du PAG

Les espaces forestiers du PAG, au sein du Plateau des Guyanes, diffèrent de ceux, plus étudiés, de la côte tant par un niveau moindre de perturbation anthropique que par des conditions pédologiques, climatiques et orographiques différentes. A partir de la typologie des paysages et des espaces géomorphologiques proposée par Guitet et al. (2013), on peut distinguer au sein du PAG les grands ensembles suivants : les plaines, les reliefs modérés et les reliefs plus marqués. La diversité des forêts guyanaise, liée aux conditions pédologiques, a été étudiée par Guitet (2015). La carte des Habitats (ONF, 2015) présentée ci-dessous identifie les différents types de forêts existants au sein du PAG.

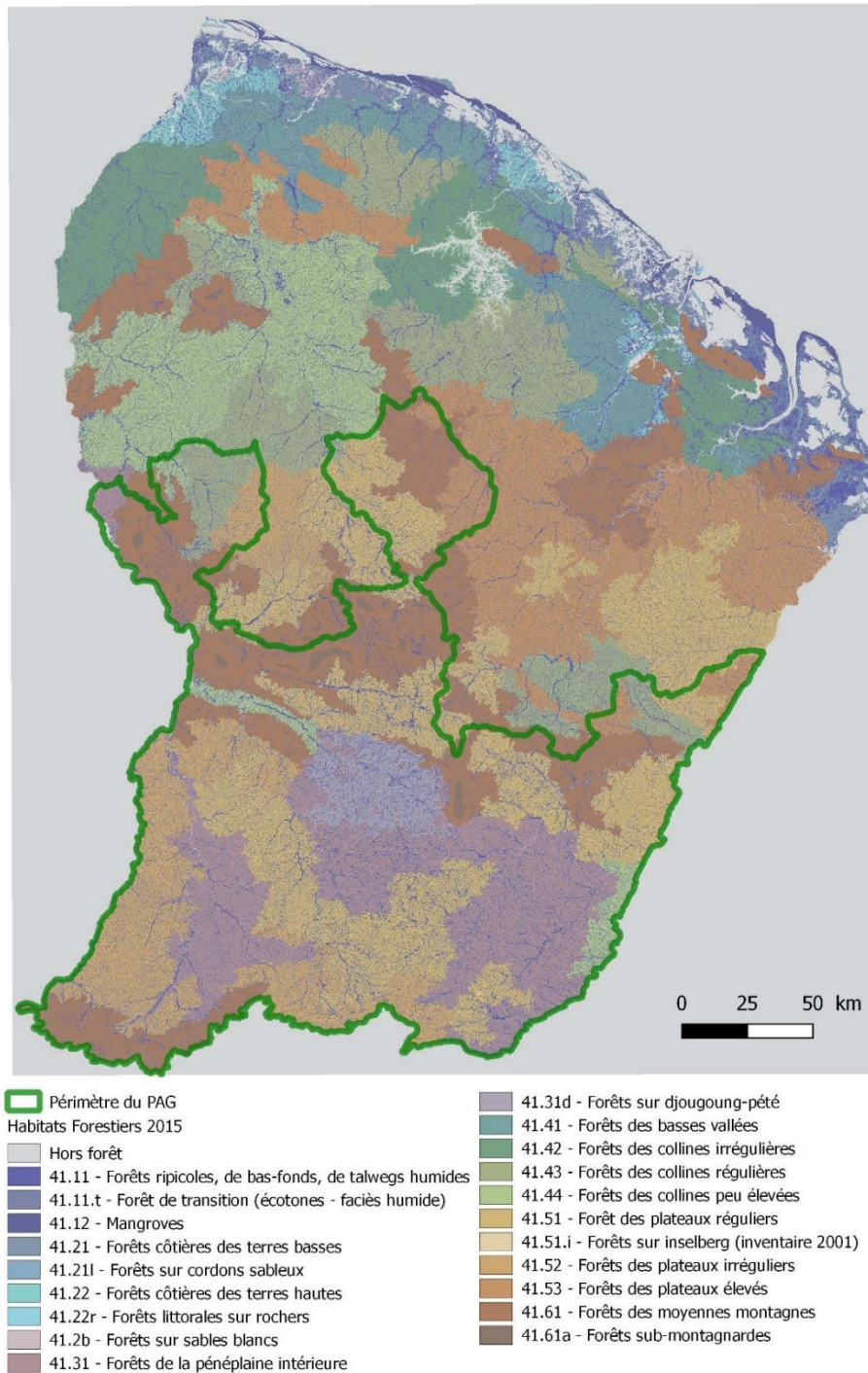


Figure 2 : Carte des habitats forestiers (ONF 2015)

## Stocks typiques de carbone

On trouve dans la littérature des valeurs générales de stock de carbone, prenant en compte tout ou partie des compartiments (biomasse vivante aérienne et souterraine des grands arbres, biomasse vivante des petites tiges et autres (épiphytes, lianes, palmiers), bois mort, litière, sol). Ces valeurs peuvent être exprimées en quantité de biomasse (tonnes de matière sèche ou tms) ou en carbone (tC).

- **Stock dans la biomasse aérienne des grands arbres**

Le stock de carbone dans la biomasse épigée (avec DBH>10cm) est estimé à 287 t/ha (143,5 tC/ha) en Amazonie en général, 387 t/ha (193,5 tC/ha) sur le Plateau des Guyanes en général (Mitchard et al, 2014). En Guyane Française, les estimations sont de 196.5 tC/ha [84-253] (393 t/ha) (Guitet 2015 d'après Mitchard et al, 2014), 153 tC/ha, 132 tC/ha, 134 tC/ha et 223 tC/ha (Fayad et al, 2016, Baccini et al., 2012, Saatchi et al., 2011, Avitabile et al., 2016).

Pour le PAG spécifiquement, une valeur de 309 t/ha (154,5 tC/ha) est disponible (PAG, 2015). Les valeurs de biomasse aérienne des grands arbres en Guyane sont généralement plus élevées que dans le reste de la région (Feldpausch et al. 2011 ; Mitchard et al, 2014 ; Guitet et al. 2015 ; Fauset et al. 2015). Les variations de mesure inter-site sont très importantes, allant de 186 tC/ha (Yaroupi) à 320 tC/ha (Haute-Matarony) (Guitet, 2015).

La carte de Fayad et al. (2016) constitue la référence la plus pertinente à prendre en compte pour cette étude. Elle permet d'estimer le stock de carbone dans la biomasse des grands arbres sur le périmètre du PAG.

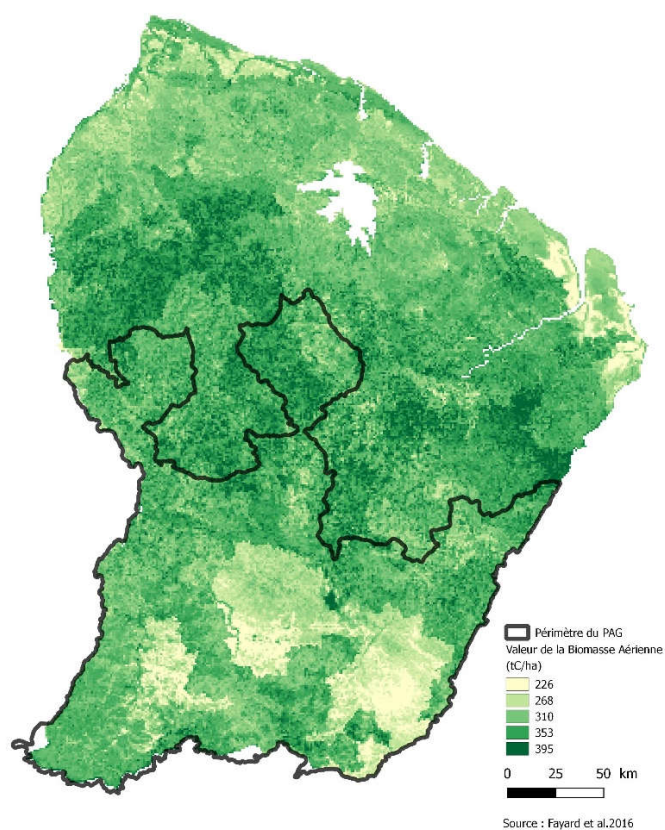


Figure 3 : Carte de la biomasse aérienne (Fayard et al. 2016)

- ***Reste de la biomasse***

Des valeurs de 21 tC/ha pour les petits arbres, de 11,5 tC/ha [7,5-15] pour la végétation restante, de 15 tC/ha [10-20] pour la végétation épigée morte, soit une valeur moyenne de 27,5 tC/ha [15-40] ont été données à dire d'expert dans l'étude du PAG (2015).

- ***Stock de carbone organique du sol***

Pour le PAG spécifiquement, une valeur de 100 tC/ha est disponible (PAG, 2015), avec une fourchette pour l'ensemble de la Guyane Française de 74-121 tC/ha (Guitet, 2015).

- ***Total du carbone stocké***

En prenant en compte les différentes estimations disponibles pour l'ensemble des compartiments carbone, on trouve l'estimation du stock total de carbone dans le PAG suivante :

**331 tC/ha [303-357] (PAG, 2015).**

## **Flux de carbone et bilan carbone**

Le bilan carbone de l'écosystème forestier en Amazonie est incertain. Certaines études scientifiques tendent à montrer que la forêt amazonienne en général ou des espaces plus proches du PAG en particulier auraient un rôle de puits (tendance à stocker du carbone), d'autres montrent qu'il s'agirait plutôt d'une source (tendance à émettre du carbone). Ces résultats dépendent de multiples paramètres (périmètre, mesure ou estimation, région, échantillonnage, période...).

- ***Un puits fragile, voire une source***

La prise en compte des phénomènes de surmortalité liée à la variabilité pluvio-climatique ainsi qu'à la dégradation forestière (au-delà de la déforestation) induit des estimations qui remettent parfois en question le rôle de puits de carbone de la forêt amazonienne, notamment de la forêt du PAG. Au niveau mondial, à partir de mesures satellitaires couplées aux données de terrain, Baccini et al. (2017) concluent que les espaces forestiers tropicaux seraient une légère source, et non un puits. La croissance ne compenserait pas la déforestation ni la dégradation et perturbation (69% des pertes).

L'analyse des données forestières historiques montre que si l'Amazonie joue un rôle de puits de carbone, une tendance au déclin de cette accumulation est observée à long terme (Brienen et al., 2015). Le taux d'accroissement dans la biomasse aérienne a diminué de 2/3 entre les années 1990 et les années 2010. On observe un récent phénomène de stagnation (atteinte d'un plateau) dans la croissance, alors que la mortalité a continué d'augmenter.

- ***Un puits de carbone important ?***

D'après Philips et Brienen (2017), en Amazonie, la forêt constitue un puits persistant, même s'il s'est affaibli depuis les années 2000. En Guyane, ce puits serait d'ampleur à compenser l'intégralité des émissions générées, y compris par la déforestation et les changements d'occupation des terres.

Les forêts du PAG n'ont pas forcément la même sensibilité aux hausses de mortalité que celles du reste de la Guyane, ou du reste de la région amazonienne. La diminution du puits observée à un endroit n'est pas forcément extrapolable aux forêts du PAG. Cette sensibilité reste corrélée à la quantité de biomasse aérienne présente (Johnson, et al. 2016).

- **Au-delà des bilans, certains flux en particulier sont étudiés**

L'inventaire d'émissions de gaz à effet de serre de la France, et donc, de la Guyane, est réalisé et mis à jour chaque année par le Citepa pour le compte du Ministère en charge de l'Ecologie. Les approches pour l'Outre-Mer sont différentes de celles mises en place pour la métropole en raison des différences dans les données mobilisables. Néanmoins les considérations méthodologiques génériques sont les mêmes.

Actuellement dans l'inventaire français, il est calculé pour la Guyane :

- Les émissions dues à la déforestation et l'orpaillage ;
- Les émissions des sols organiques cultivés,
- Les émissions liées au barrage du Petit-Saut

Toutefois, pour la forêt sans changement, une hypothèse de neutralité est appliquée.

Dans l'inventaire, une étude de l'IGN est utilisée (Lefebvre & Verger 2014) grâce à l'outil de télédétection qui permet un suivi de la dynamique de déforestation de la Guyane. Au cours de la période 1990 et 2012, les résultats mettent en évidence une diminution de la surface forestière de plus de 1%, soit 93 300ha, qui se concentre sur un quart du territoire ainsi qu'une accélération de la déforestation sur les dernières années. Cette déforestation est imputable à hauteur de 35 % aux cultures (33 044 ha), à hauteur de 30 % aux infrastructures (28 064 ha) dont 22 % dues à l'orpaillage (20 703 ha) et à hauteur de 6 % aux prairies (6 008 ha).

L'hypothèse de neutralité provient de Guitet et al. (2006), reprise dans l'inventaire national du Citepa qui indique : « Il a donc été choisi de manière conservatrice de conserver une hypothèse de stabilité de la biomasse forestière dans ces territoires en considérant que l'accroissement permet seulement de compenser les récoltes et ne génère pas de puits supplémentaire ». L'accroissement est donc indirectement estimé à partir du taux de prélèvement, et s'élève à 0.02tC/ha (aérien + racinaire). Pour les terres ayant été boisées depuis moins de 20 ans, la valeur de 1tC/ha comme en métropole est utilisée, en cohérence avec Guitet et al. 2006 (valeur d'accroissement après récolte entre 1.5tC et 2tC/ha).

Pour l'inventaire français, des calculs préliminaires, appliquant les équations du Giec avec des paramètres par défaut (donc un calcul a priori peu fiable), avec 850 000 ha de forêt « gérée » en Guyane, donnaient les résultats suivants : un taux d'accroissement de 2,17 tC/ha/an, soit un accroissement de 1 844 673 tC/an ; et environ 300 000 tC/an de pertes (dont 43091 tC/an de prélèvement, 16909 tC/an et 120 398 tC de pertes liées aux récoltes (mortalité et résidus) ; et 119 267 tC/an de mortalité).

La question de la notion de forêt gérée se pose particulièrement en Guyane. En effet, comme il n'est pas possible de distinguer clairement ce qui relève directement ou indirectement de l'activité humaine,



et ce qui est purement naturel, l'approche recommandée par le Giec et de comptabiliser comme anthropiques tous les flux de GES ayant lieu sur un territoire dit « géré ». Cette gestion peut être d'ordre économique, mais aussi écologique. **Ainsi, il est possible à terme de préciser deux zones au sein du PAG : une zone dite gérée pour lesquels les flux sont comptabilisés et une zone dite non gérée, pour laquelle les flux peuvent être estimés, mais comptabilisés à part, comme non-anthropiques.**

Les pays voisins (Guyana, Suriname, Brésil) disposent eux aussi d'estimations et d'hypothèses sur les flux de GES liés à leur territoire et à leur gestion forestière. Leurs approches, présentées par exemple dans le cadre d'inventaires nationaux, de Communications nationales ou de projets REDD+, pourraient servir de base à la comptabilisation carbone au sein du PAG.

## 2. Méthode

### 2.1 Méthodes génériques de calcul des stocks et flux carbone

Estimer les flux de gaz à effet de serre des terres est une tâche difficile, car les flux d'émission et de séquestration participent à la fois à des phénomènes naturels et anthropiques, parfois mal connus, et souvent difficiles à suivre avec précision. En forêt par exemple, il n'est pas possible d'avoir une approche exhaustive comme pour les bilans carbone d'activités industrielles. Il faut recourir à des simplifications, des hypothèses, des extrapolations.

Deux grandes approches sont possibles : l'observation directe et l'estimation indirecte. L'observation directe, consiste à mesurer sur le terrain (ex : avec des tours à flux) ou à distance (ex : par télédétection satellitaire), les flux (ou la variation de concentration) de gaz à effet de serre. A l'inverse l'estimation indirecte, consiste à estimer les flux à partir d'autres données ou observations, par exemple l'évolution de la taille des arbres, ou l'évolution des surfaces de forêt. La seconde approche a l'avantage de pouvoir détailler les différents flux considérés, de les expliquer, et de pouvoir être appliquée à des territoires pour lesquels il n'existe que peu de données et de dispositifs d'observation. C'est cette approche indirecte qui est appliquée dans les inventaires nationaux d'émissions de gaz à effet de serre. De même, c'est l'approche retenue dans cette étude, même si des résultats issus de l'observation seront aussi compilés.

Le référentiel méthodologique pour la comptabilisation des flux de gaz à effet de serre du secteur de l'utilisation des terres, des changements d'affectation des terres et de la forêt est le volume 4 des lignes directrices du Giec pour l'établissement des inventaires d'émissions (Giec, 2006).

Dans cette étude, nous considérons les cinq grands compartiments de carbone tels que décrits dans le Giec (2006) : biomasse vivante aérienne, biomasse vivante souterraine, biomasse morte, litière, sol. Les gaz à effet de serre qu'il est possible de comptabiliser dans cette étude sont : le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et le dioxyde d'azote (N<sub>2</sub>O). Compte tenu de la portée de l'étude, nous nous concentrerons sur le CO<sub>2</sub>.

Les paramètres de calcul considérés sont les suivants :

- Facteur de conversion du carbone vers le CO<sub>2</sub> :  $\frac{44}{12}$  ;
- Facteur de conversion de la biomasse à la matière sèche : 0,47
- Par défaut le ratio tC/tms est de 0,47

Selon la situation d'un espace, les différents compartiments de carbone vont voir leur stock stagner, augmenter ou diminuer. Ces stocks sont dynamiques, ils connaissent des pertes de carbone, vers un autre compartiment (par exemple biomasse vivante vers la biomasse morte et la litière) ou vers l'atmosphère (sous forme de CO<sub>2</sub>) ; ou bien des gains. Ces pertes et gains peuvent se compenser et le bilan, pour le stock, sera neutre. Cela peut être le cas pour une forêt où les pertes (mortalité, éventuelles perturbations comme la récolte, la dégradation, la surmortalité liée à de la sécheresse...) sont contrebalancées par la croissance de la biomasse. Le bilan est aussi déterminé par les effets de fertilisation du CO<sub>2</sub> et la redéposition de l'azote (Baccini et al., 2012).

Dans l'approche des inventaires, l'estimation des flux peut se faire selon deux modalités : par *variation de stock* ou par la méthode *gains-pertes*. Soit on considère le stock initial et final pour en déduire des flux ; soit on additionne les gains et les pertes (flux bruts) de carbone pour estimer directement le flux net. **L'approche par variation de stock est choisie pour cette étude.**

## 2.2 Elaboration des contextes socio-environnementaux

Au lieu d'une approche globale, une approche par situation a été choisie. Ainsi le PAG a été découpé virtuellement en plusieurs zones. Cette approche permet à la fois de séparer les calculs et les hypothèses et d'avoir une approche spatialisée. L'avantage est aussi que chaque contexte est indépendant et peut être affiné ultérieurement.

Chaque zone correspond à un **contexte socio-environnemental** ou **CSE**. Chaque CSE décrit à la fois l'occupation biophysique, les différents régimes d'usages, de perturbation, etc. C'est une approche statique : une photographie à un moment donné, peu importe l'étape à laquelle on se trouve. Par exemple pour un cycle de rotation, on considère l'ensemble du processus, le bilan sur le long terme, cumulant des zones étant à des étapes différentes. Ces contextes simplifient les situations réelles et ne prennent pas en compte tous les paramètres possibles. Ils peuvent être affinés par la suite.

Pour chaque CSE, on estime un stock initial puis un stock final via un processus d'évolution spécifique à chaque contexte dans lequel les hypothèses d'évolution des stocks sont construites selon un scénario propre. Pour chacun des CSE, il s'agit d'estimer :

- La part de chaque compartiment qui est perdue ou gagnée ;
- L'état des stocks initiaux et finaux ;
- La production nette ;
- Les échelles temporelles à considérer
- La surface concernée

Les données ne sont pas toujours disponibles, valables ou pertinentes à l'échelle du PAG. Les valeurs utilisées sont issues d'estimations existantes dans la littérature ou bien de calculs à partir d'hypothèses respectant les méthodologies préconisées par le Giec. Les estimations issues de la bibliographie ne proviennent pas toujours de travaux portant sur le PAG uniquement : les valeurs obtenues dans un cadre plus général (la Guyane, le Plateau des Guyanes, l'Amazonie...) sont alors extrapolées au niveau

du PAG. Pour chaque donnée estimant la production nette de carbone, l'étude précise les éventuelles incertitudes en lien avec les hypothèses choisies.

Pour cette première estimation, le stock initial de carbone présent est estimé à partir du stock moyen de 331 tC/ha d'après Fayad et al (2016). Il s'agit d'une limite qui pourrait être affinée en cherchant à savoir si le CSE a lieu dans des espaces où le stock initial est particulier (par exemple plus élevé ou plus faible que la moyenne).

Pour l'analyse des surfaces, les années de références sont 2008 et 2015. Il s'agit ainsi d'une photographie du PAG à deux instants donnés à 7 ans d'intervalle. Le PAG ayant compilé une base de données d'occupation du sol, cette couche SIG est donc la référence pour l'analyse des surfaces de 5 CSE. La sémantique est d'ailleurs reprise pour décrire l'occupation du sol. Seul le CSE concernant l'orpaillage utilise une données supplémentaires issues de l'observatoire de l'activité minière, extraite à l'échelle du territoire du PAG.

Les hypothèses sont discutées et affinées suite aux entretiens d'experts. Cinq experts ont été sollicités et deux entretiens ont été menés avec Géraldine Derroire et Stéphane Guitet, spécialistes des questions carbone. Deux référents PAG ont été sollicités pour s'appuyer sur leurs connaissances des territoires à savoir Sarah Ayangma pour affiner les CSE agricoles et Pierre Joubert pour bien comprendre l'origine des données AgriPag et les données sur l'orpaillage afin de préciser les CSE.

Les 6 contextes socio-environnementaux qui ont été définis après concertation sont :

- 1) forêt mature sans prélèvement
- 2) forêt mature avec prélèvement
- 3) abattis itinérant traditionnel long et abattis itinérant à cycle court
- 4) orpaillage
- 5) déforestation pour mise en culture
- 6) déforestation pour usage non-agricole

Chaque contexte est décrit ci-dessous.

## 3. Résultats

### 3.1 Description des Contextes socio-environnementaux

Pour les forêts sans changement d'occupation, les variations de stocks sont principalement liées à la biomasse (croissance et mortalité). La dynamique du taux de carbone des sols en forêt guyanaise reste encore trop incertaine pour être intégrée à cette étude.

Pour les flux liés à la décomposition du bois mort, Herault et al. (2010) fournissent une approche méthodologique basée sur deux critères : la circonférence des arbres et la densité du bois. Pour simplifier les estimations, des hypothèses sur la production nette (croissance moins mortalité) sont à privilégier.

Le contexte socio-environnemental décrit à la fois l'occupation biophysique, les différents régimes d'usage, de perturbation etc... Il s'agit d'une approche statique mais qui permet une vision intégrative cumulant des zones à des étapes différentes et aux régimes d'évolution différents.

Ci-après, chaque CSE est décrit par ;

- Un stock initial et final estimés et la définition des hypothèses de calcul
- Une estimation des surfaces concernées par le CSE sur le PAG en 2008 et 2016, avec un calcul des surfaces gagnées ou perdues
- Un bilan net C pour chaque CSE
- Les pistes d'amélioration

#### 3.1.1 CSE 1 : Forêt mature sans récolte

##### a) Description du CSE

Il s'agit des territoires où la forêt n'est pas concernée par des perturbations anthropiques (exploitation du bois, abattis, orpaillage). Il faut alors estimer si dans ce cas la forêt a atteint un équilibre entre pertes et gains ou si elle constitue un léger puits ou une légère source.

Les forêts sont affectées par des perturbations naturelles (feux, maladies importantes, sécheresse, tempêtes) entraînant une surmortalité. Il s'agit surtout pour le PAG de la sécheresse (variations pluvio-climatiques) et des tempêtes avec le phénomène de *blow-down* (dont l'impact est variable selon le sol, sa profondeur et son hydromorphie)<sup>1</sup>. Cette surmortalité entraîne un bilan émetteur pour ces espaces, car même si les pertes sont en partie compensées par des repousses, l'écosystème reste fragilisé et les arbres voient leur croissance ralentie. Toutefois, il n'est pas possible de faire une hypothèse quantifiée sur le niveau de ces flux à partir de la littérature (Townsend et al., 2011) pour le PAG spécifiquement.

---

<sup>1</sup> Entretien Guitet

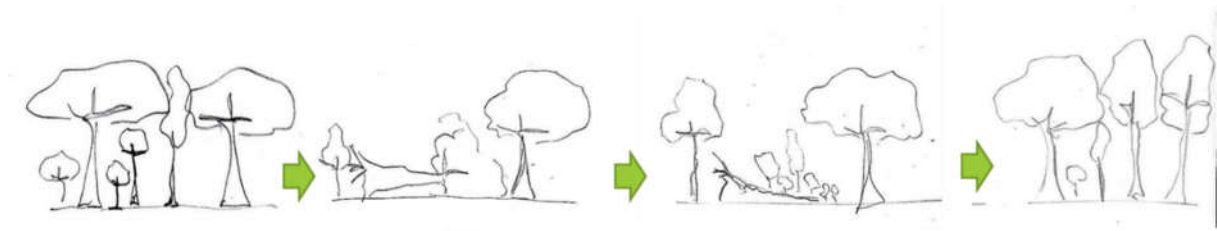


Figure 4 : schéma du SCE 1 - forêt mature non exploitée

Le schéma ci-dessus décrit le processus de dynamique naturelle de la forêt sans perturbation anthropique. La mortalité des arbres est due à des phénomènes naturels. La repousse est assurée par la banque de semences présente dans le sol à l'état naturel. Les essences pionnières héliophiles sont les premières à recoloniser le milieu, s'ensuivent les essences à croissance plus lentes pouvant croître en sous-bois.

### b) Hypothèse de calcul des stocks initiaux et finaux pour établir le bilan global



A défaut de valeur disponible représentative du PAG, en première analyse, **l'hypothèse de neutralité est considérée<sup>2</sup>**. L'état des connaissances tend à démontrer que si le rôle de puits peut exister, il est faible et à tendance à s'affaiblir, compte tenu de l'évolution des perturbations.

### c) Estimation des surfaces

On considère que la forêt mature non exploitée est constituée de 4 catégories d'occupation du sol dans AgriPag à savoir :

- Forêt ancienne
- Spécial (qui réunit des formations végétales particulières mais sans perturbation récentes de l'homme, telles que les cambrouzes...)
- Végétation hydromorphe basse
- Végétation particulière

La forêt mature non exploitée constitue la majeure partie du PAG. Sur ses 3,4 Mha, la forêt mature non exploitée correspond à 3 358 0044 ha en 2008 et à 3 356 580 ha en 2015 d'après AgriPag. On constate

<sup>2</sup> Hypothèse confirmée en entretien avec S. Guitet

ainsi une différence de -1 464 ha sur 7 ans, soit un recul de la forêt de **209ha/an**. Ce recul de la forêt mature est essentiellement localisé autour des bourgs.

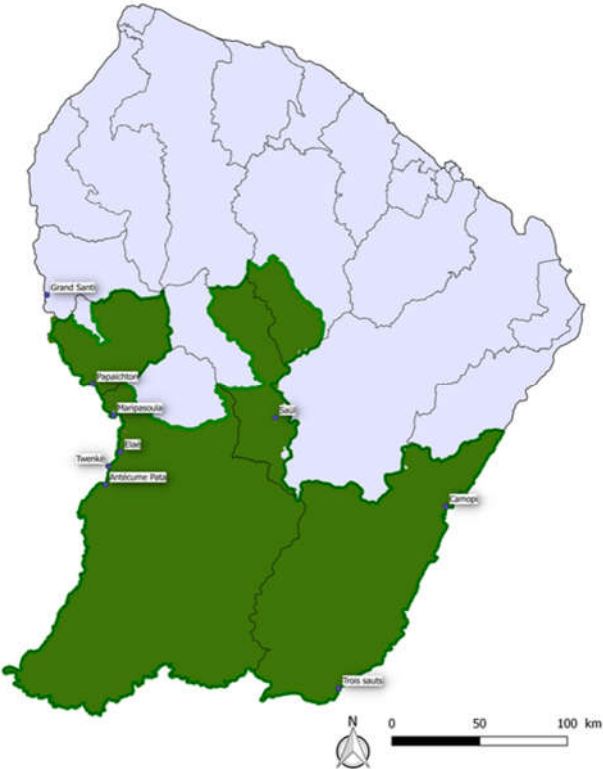


Figure 5 : Surfaces de forêt mature non exploitée à l'échelle du PAG

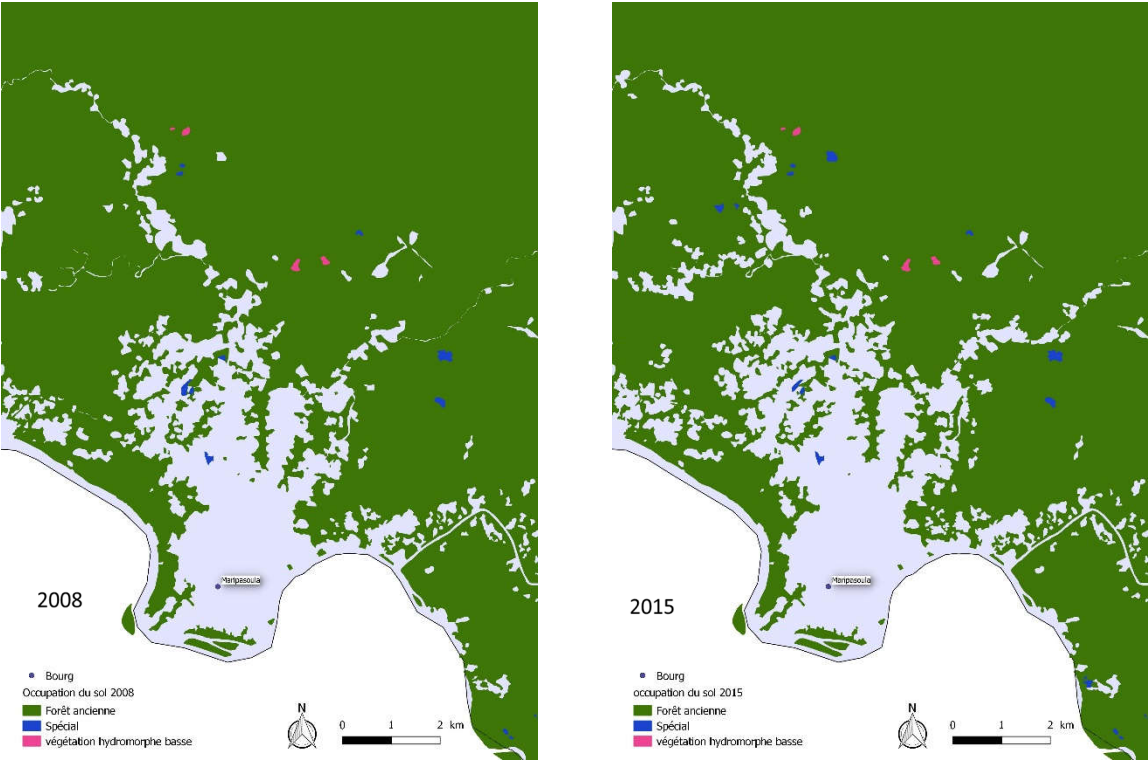


Figure 6 : Zoom des surfaces matures non exploitées sur la Commune de Maripasoula

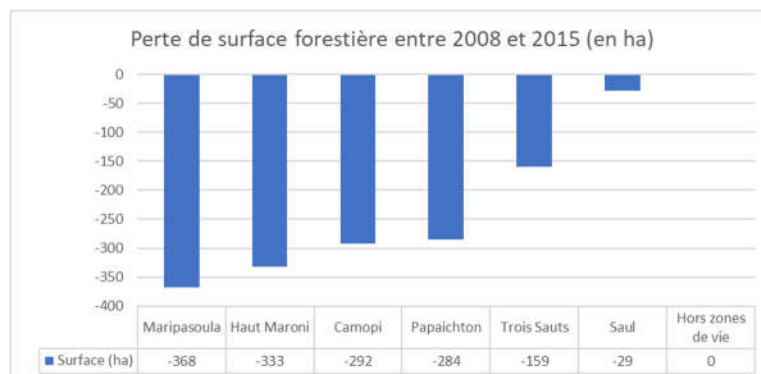


Figure 7 : Perte de la surface forestière entre 2008 et 2015 (en ha) par commune - surface nette

Le graphique ci-dessus, montre que Maripasoula et le Haut Maroni représentent à eux seuls la moitié du recul de la forêt mature avec respectivement -367 ha sur Maripasoula et -332 ha sur le Haut Maroni. Camopi représente 20% du recul de la forêt mature avec 291 ha.

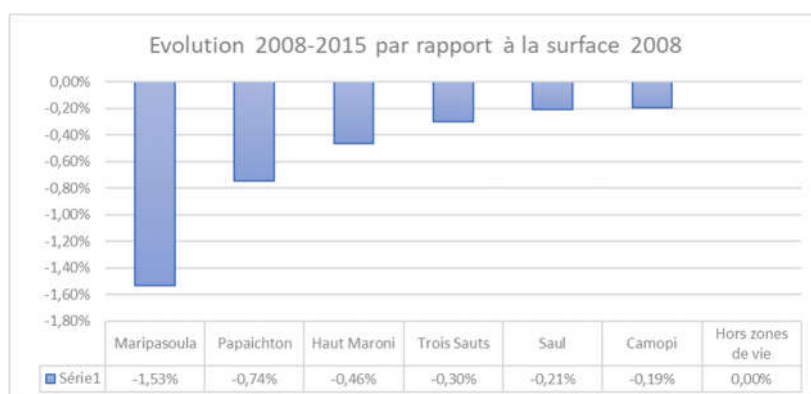


Figure 8 : Evolution de la surface forestière mature entre 2008 et 2015 par rapport à la surface de 2008 (en ha) par commune

Maripasoula perd 1,53% de sa surface forestière par rapport à la surface de 2008, ce qui correspond à 367ha. Papaïchton perd 0,74% soit 284ha et le Haut-Maroni perd 0,46% soit 332ha. La commune de Maripasoula (incluant les territoires de Maripasoula et du Haut Maroni d'après le découpage du PAG) présente la dynamique la plus importante de dégradation de la surface forestière mature. Ce phénomène s'explique notamment au regard de la dynamique démographique de cette commune dans laquelle la population a presque doublé en 5 ans (+45% entre 2009 et 2014, source INSEE 2017) et connaît actuellement une mise en place d'infrastructure et de services à la population importante en plus de l'étalement agricole sur le pourtour du bourg qui sont deux phénomènes consommateurs de surface forestière.

Papaïchton enregistre un taux d'évolution annuel de 10,6% entre 2009 et 2014 avec une population qui a augmenté de 2/3, passant de 3976 en 2009 à 6572 en 2014. Cette pression démographique a des conséquences sur l'emprise foncière et donc l'occupation des sols, au détriment de la forêt mature non perturbée.

#### d) Bilan

On calcule ainsi le bilan :

	CSE 1	
	forêt mature sans récoltes	
	<i>fourch. basse</i>	<i>fourch. haute</i>
Stock initial (tC/ha)	331	331
<i>Dont biomasse</i>	231	231
<i>Dont sol</i>	100	100
Évolution stock biom. %	0	0
Évolution stock sol %	0	0
Stock final (tC/ha)	331	331
Flux (tC/ha/an)	0	0
Surface (ha/an)	3358044	3358044
Bilan PAG (tC/an)	0	0
Bilan PAG (tCO2/an)	0	0
Ordre de grandeur (tCO2/an)	<b>0</b>	<b>0</b>

Figure 9 : Bilan CSE 1 forêt mature sans récolte

Le bilan du CSE 1 – *forêt mature sans récolte* est donc de zéro selon l'hypothèse d'équilibre des flux.

#### e) Perspectives d'amélioration

Actuellement, on ne dispose pas de données suffisamment précises sur l'ensemble du territoire du PAG<sup>3</sup> pour pouvoir faire la distinction de la forêt par type d'habitat (cf. carte des habitat, ONF 2016). Il serait intéressant de connaître la séquestration carbone propre aux forêts de flat, aux plateaux etc... afin d'affiner le bilan Carbone forestier et considérer de manière plus précise cette entité forestière actuellement « d'un seul bloc » qui est pourtant composée d'une multitude de forêts (cf. carte des habitats forestiers).

Des modèles de prédiction de stress hydriques et de réponse des différents faciès forestiers permettraient de déterminer la sensibilité des habitats aux changements climatiques et mettre en avant leur vulnérabilité ou leur capacité de résilience.

Enfin, l'importance des phénomènes de blow-down dans la dynamique forestière pourrait avoir un impact non négligeable sur la capacité de la forêt à séquestrer du carbone. L'étude de la dynamique des différents faciès forestiers a été initiée par le projet Dynfordiv (finalisé en 2017) mais pourrait être

---

<sup>3</sup> Coms pers Guitet : Cette analyse serait possible sur Saül en zone de montagne et Trois Saut en zone de plaine intérieure. Une autre analyse consisterait à croiser la carte biomasse avec la carte Agripag en considérant les zones de perte de forêt.



poursuivi afin de mieux déterminer l'impact de cette dynamique sur le fonctionnement de l'écosystème forestier et notamment sur sa capacité à séquestrer le carbone.

A l'image des stations de suivis existantes à Paracou et aux Nouragues, il serait intéressant que le PAG puisse mettre en place des dispositifs de suivis sur des forêts spécifiques au PAG, telles que les forêts du sud de la Guyane qui présentent a priori des profils et des fonctionnements différents des forêts étudiées par ces deux dispositifs.

### 3.1.2 CSE 2 : Forêt mature avec récoltes

#### a) Description du CSE

Pour répondre aux demandes en infrastructures et promouvoir une ressource durable, il existe des zones d'exploitation forestières au sein du PAG avec des contrats d'exploitation attribués par l'ONF. Les secteurs concernés sont :

- Maripasoula : environ 1750 ha en contrat d'exploitation
- Papaïchton : 572 m<sup>3</sup> exploités entre 2011 et 2016
- Saül : 54 ha en contrat d'exploitation

Les données disponibles pour Maripasoula et Saül sont des données de surfaces d'exploitation, tandis que pour Papaïchton il s'agit de volumes extraits.

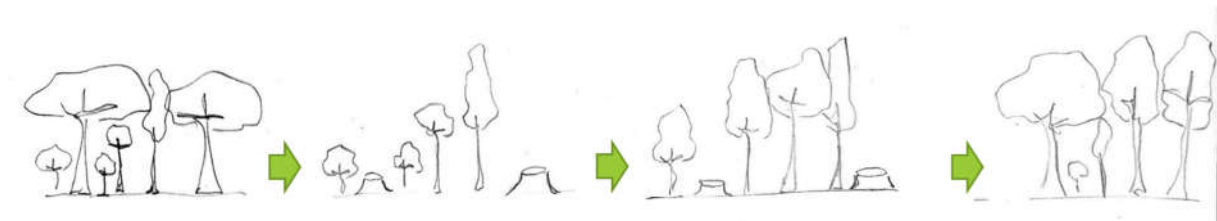


Figure 10 : schéma du SCE 2 - forêt exploitée

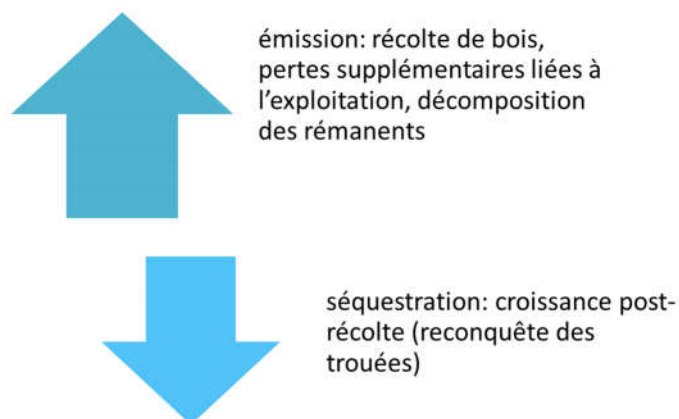
L'exploitation forestière se fait sur la base de contrats d'exploitation de gré à gré entre l'ONF et un exploitant forestier. Une zone d'exploitation est attribuée au sein de laquelle un inventaire non exhaustif des bois exploitables est dressé par les équipes de prospection de l'ONF. Le contrat d'exploitation est établi sur une surface forestière à exploiter et un volume donné. L'extraction des bois se fait par « cueillette » sur plusieurs années à raison d'un prélèvement de 5 tiges par hectare. Après exploitation le temps de révolution est de 65 ans. Ces prélèvements sont encadrés par une charte « Exploitation à Faible Impact » pour assurer la gestion durable de la forêt, permettant ainsi de conserver un capital sur pied important (Guitet et al, 2012 ; Guitet, 2015).

#### b) Hypothèse de calcul, estimation des pertes directes, indirectes et en partie compensées par la repousse

Les pertes ont été estimées, faute de données globales représentatives de l'exploitation à l'échelle du PAG, en extrapolant les volumes récoltés à Papaïchton. Ce volume de 573 m<sup>3</sup> pour la période 2011-2016 correspond ainsi à une récolte moyenne de 114 m<sup>3</sup>/an. On applique d'une part des fourchettes hautes et basses autour de cette estimation (très approximative) du volume de bois sorti, ce qui donne entre

86 et 132m<sup>3</sup>/an. Ensuite, une hypothèse d'extrapolation considère que ce volume ne représente qu'un quart du volume total récolté dans le PAG (¼ à Papaïchton, ¼ à Saül et ½ à Maripasoula)<sup>4</sup>, ce qui donne un volume total entre 344 et 527 m<sup>3</sup>/an. En appliquant les facteurs par défauts fournis par le Giec (Rapport entre biomasse aérienne et souterraine, facteur d'expansion et de conversion, fraction de carbone) (voir fichier de calcul), on convertit ces volumes en carbone : 982 à 1506 tC/an, soit 3602 à 5522 tCO<sub>2</sub>/an.

A ces pertes directes sont ajoutées des pertes liées à des dégâts d'exploitation. L'hypothèse par défaut appliquée ici est une majoration de 10% des pertes directes. Enfin, ces pertes directes et indirectes sont en partie compensées par la repousse d'une partie des arbres extraits, avec 1/3 du stock initial réatteint.



### ***c) Estimation des surfaces***

Sur la période 2008-2015, les données sont approximatives étant donné qu'avant 2014 il n'y avait pas de suivi de l'exploitation forestière annuel (pas de cubage précis). Seul le suivi du contrat d'exploitation arrivant à échéance ou une demande explicite d'un exploitant forestier faisait l'objet d'un décompte en termes de surface exploitée ou volume de bois. Par ailleurs les surfaces exploitées font référence aux surfaces des parcelles attribuées et non à la surface réellement exploitée, étant donné que l'exploitation se fait par un prélèvement ponctuel de 5 tiges/ha et non de manière systématique. C'est pourquoi le calcul s'est basé sur la donnée en volume de bois, plutôt que de la surface exploitée.

Pour la période 2008-2015, il est donc impossible d'identifier une surface globale exploitée. Le volume de bois exploité est extrapolé comme détaillé ci-dessus.

On note que pour Maripasoula, il s'agit a priori d'une opération de « défruitage » qui consiste à décapitaliser les parcelles en essences commerciales et bois nobles via l'exploitation forestière avant installation agricole (ou urbanisation progressive).

---

<sup>4</sup> Confirmation à dire d'expert du conseil scientifique du PAG

#### d) Bilan

On calcule ainsi le Bilan

	CSE 2	
	forêt mature avec récoltes	
	<i>fourch. basse</i>	<i>fourch. haute</i>
Stock initial (tC/ha)	331	331
<i>Dont biomasse</i>	231	231
<i>Dont sol</i>	100	100
Evolution stock biom. %	n.c	n.c
Evolution stock sol %	n.c	n.c
Stock final (tC/ha)	n.c	n.c
Flux (tC/ha/an)	n.c	n.c
Surface (ha/an)	-	-
Bilan PAG (tC/an)	720	1104
Bilan PAG (tCO <sub>2</sub> /an)	2641	4050
Ordre de grandeur (tCO <sub>2</sub> /an)	<b>3000</b>	<b>4000</b>

Figure 11 : Bilan CSE 2 forêt mature avec récolte

Le bilan final est une perte nette de 720 à 1104 tC/an, soit 2641 à 4050 tCO<sub>2</sub>/an (soit un ordre de grandeur moyen de 3500 tCO<sub>2</sub>/an).

Le bilan du CSE 2 – *forêt mature avec récolte* est donc estimé entre 3000 et 4000 tCO<sub>2</sub>/an en fonction du volume estimé de prélèvement.

#### e) Perspectives d'amélioration

Un suivi régulier avec cubage est mis en place par l'ONF (en partenariat PAG-ONF) afin de faire remonter une donnée d'exploitation plus fiable que celle disponible pour la présente étude. En effet, l'estimation actuelle se base sur deux éléments très approximatifs : d'une part le volume global récolté ; et d'autre part des paramètres par défaut pour estimer les flux de carbone associés directement (pertes) et indirectement (dégâts d'exploitation, repousse) à cette récolte. Les estimations disponibles au niveau du littoral (avec une récolte typique de 5t/ha) ne pouvaient pas être mobilisés ici car le mode d'exploitation forestière au sein du PAG est différent en termes de matériel utilisé (débardages sciage etc...). Les engins d'exploitation sont souvent de moindre portance et peuvent causer des dégâts moindres sur les peuplements. Par ailleurs, l'exploitation forestière a lieu dans un périmètre de 10 km maximum du bourg et donc de l'usine de sciage (voir sciage en forêt par gruminette ou scie mobile) ce qui réduit considérablement les émissions dues aux transports. Il serait ainsi intéressant d'estimer le bilan carbone de l'exploitation forestière du PAG et redéfinir les différentes hypothèses, en s'inspirant de la méthodologie utilisée pour le bilan C de l'exploitation forestière du littoral.

Afin de suivre l'exploitation forestière, il serait intéressant de mettre en place des placettes de suivi.

### 3.1.3 SCE 3 : Abattis itinérant

#### 3.1.3.1 SCE 3.1 : Abattis itinérant traditionnel

##### a) Description du CSE

Au sein du PAG, l'agriculture est pratiquée essentiellement selon le mode d'abattis itinérant dit « traditionnel ». Cette technique consiste à abattre les arbres sur un périmètre défini (ne correspondant pas au parcellaire cadastral), puis à les brûler afin de pouvoir dégager une surface dédiée à la plantation. Les plantes cultivées sont destinées à l'autoconsommation, c'est pourquoi on parle de cultures vivrières. Généralement il existe un mix de culture entre tubercules, cucurbitacées, et arbres fruitiers. Au fur et à mesure de l'exploitation, le sol s'appauvrit (pas ou peu de renouvellement de la matière organique) et c'est pourquoi, la parcelle est alors mise en jachère longue (15-20 ans). Ce modèle d'exploitation correspondait en effet avec le mode de vie itinérant de certaines populations vivant au sein du PAG. Actuellement les familles ont une forte tendance (voir quasi-systématique) à la sédentarisation. Le retour sur abattis est donc plus précoce. La jachère peut donc être réduite à 7ans voir 3 ou 4 ans dans le cas de rotation très courtes (cf. SCE 3.2 abatis itinérant à jachère courte).

Lors du brûlis, la majorité de la biomasse est perdue, majoritairement émise vers l'atmosphère.

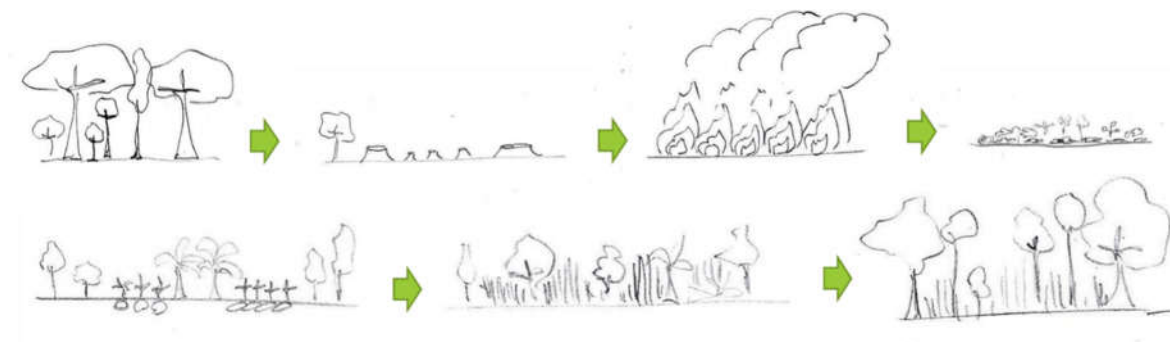
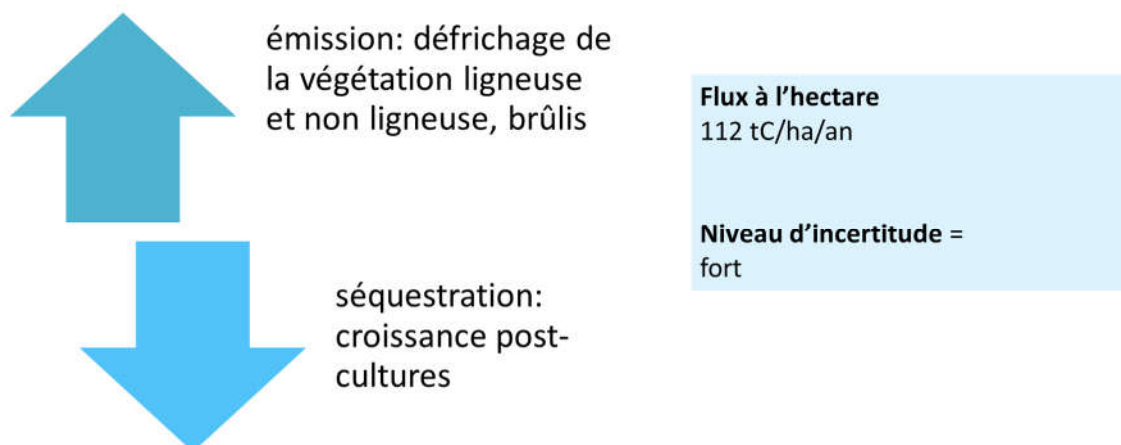


Figure 12 : Schéma du SCE 3 - abattis itinérant traditionnel (jachère longue)

##### b) Hypothèse de calcul des stocks initiaux et finaux pour établir le bilan global



Le bilan entre perte initiale de biomasse lors de l'abattis et le gain lors de la repousse dépend du temps de retour de l'abattis sur une même parcelle, donc du temps de jachère. Selon ce paramètre, entre

15ans et 20 ans, et avec une hypothèse de reconstitution du stock théorique au bout de 30 ans, on peut considérer les hypothèses suivantes :

- Perte de biomasse limitée à 60% pour des cycles longs traditionnels, et perte de 20% du stock du sol

Avec un temps assez long de 15-20 ans, les ligneux ont le temps de reconstituer une partie du stock initial. Avec une moyenne d'âge de repousse de 17,5 ans, on obtient un bilan final de perte de biomasse de 40%.

### c) Estimation des surfaces

Les données des surfaces en abattis itinérant ont été extraites de la base de données AgriPag pour les années 2008 et 2015. Les catégories utilisées sont :

- Abattis frais
- Abattis +1
- Abattis +2
- Recru

Ces catégories illustrent bien les différentes phases qui ponctuent le cycle de la mise en culture d'un abattis. Elles ne correspondent toutefois pas à des années d'exploitation car les rotations peuvent en effet durer plus de 4 ans.

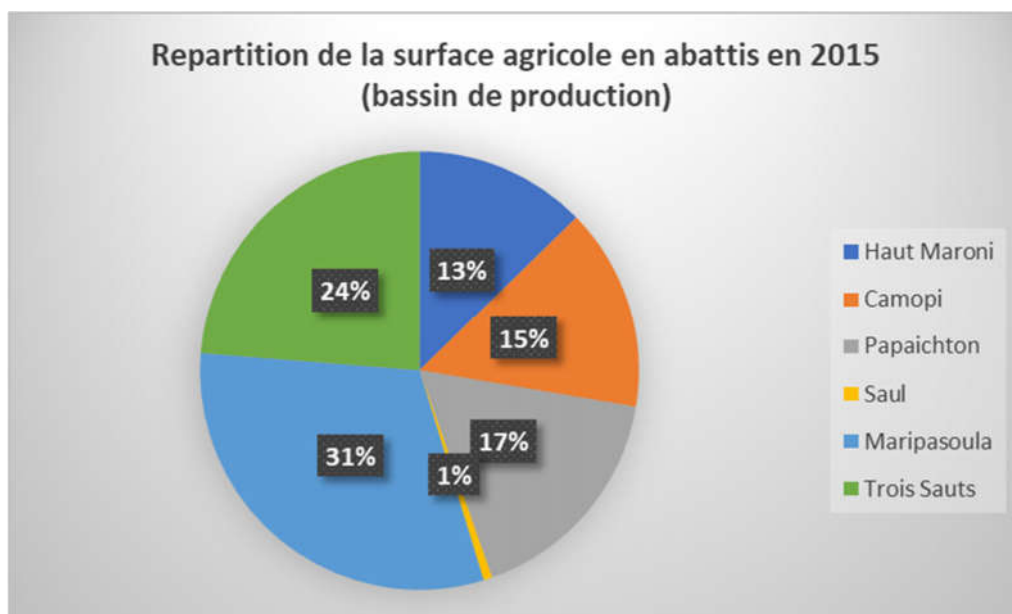


Figure 13 : Bassins de production principaux sur le périmètre du PAG

La figure ci-dessus illustre la répartition des bassins de production agricole en termes de surface (non de productivité) par territoire. Maripasoula est le principal bassin de production avec 2 570 ha (31% de la surface agricole du PAG). Trois Saut s'affiche en 2<sup>ème</sup> position avec 1 969 ha (24%) et Papaïchton en 3<sup>ème</sup> position avec 1 407ha (17%).

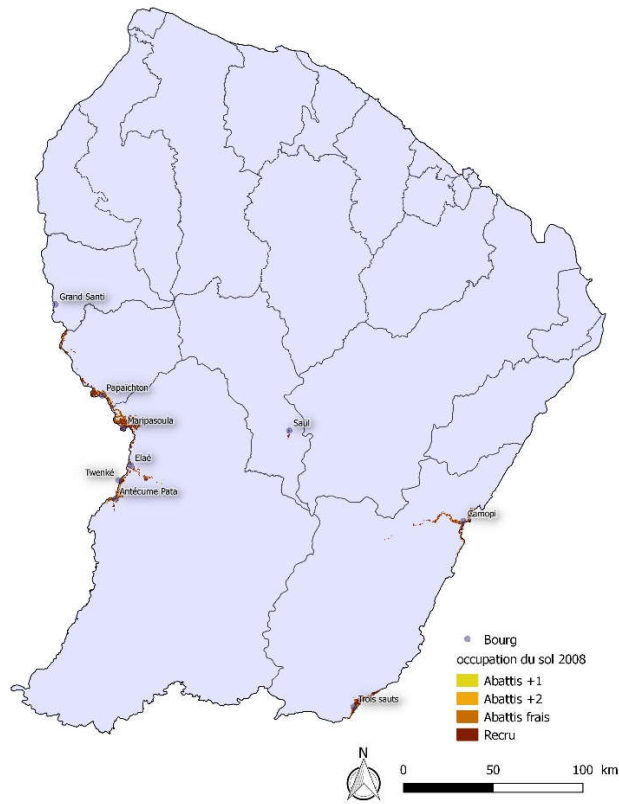


Figure 14 : Surfaces concernées par les abattis itinérants traditionnels à l'échelle du PAG en 2015

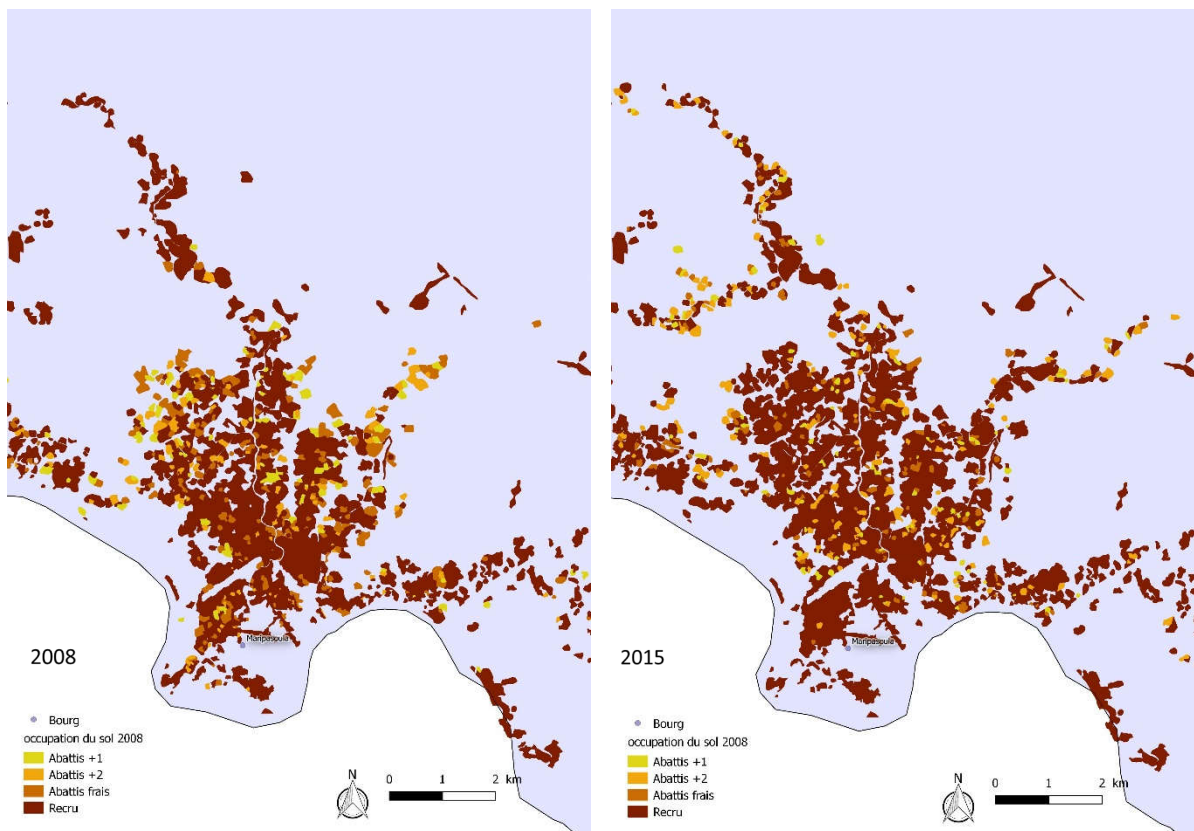


Figure 15 : Zoom sur les surfaces d'abattis itinérants sur la Commune de Maripasoula en 2008 et 2015

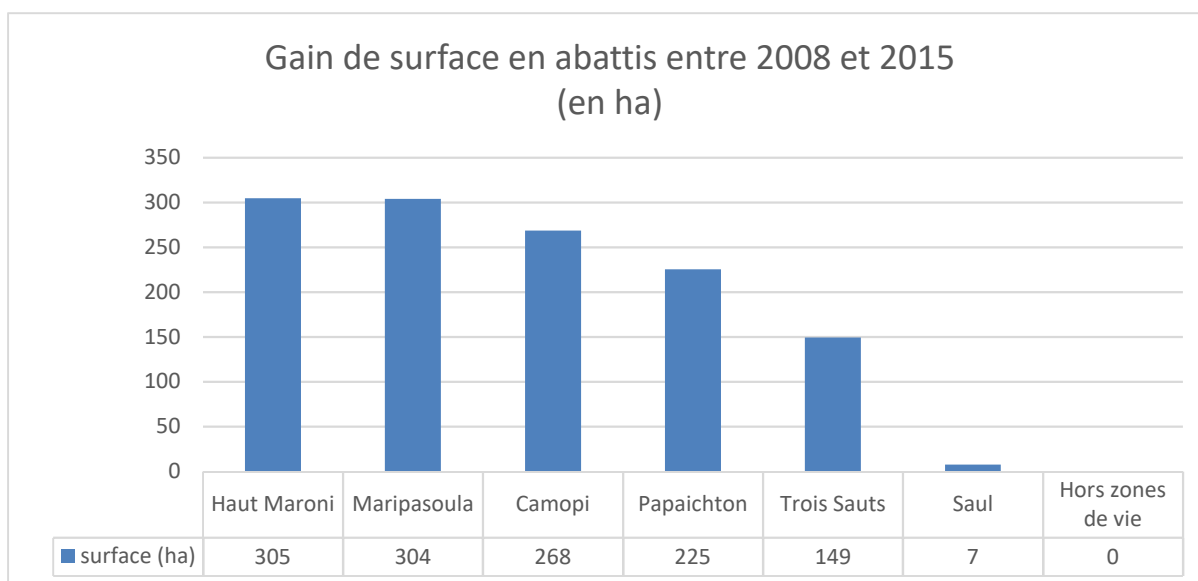


Figure 16 : Gain de surface en abattis entre 2008 et 2015 (en ha)

Le Haut-Maroni et Maripasoula comptent 300 ha de plus en 2015 par rapport à 2008. Sur l'ensemble du territoire la surface d'abattis passe de 7 038 ha en 2008 à 8 297 ha en 2015 ce qui fait une augmentation de 1 259 ha en 7 ans soit une augmentation **de 180 ha/an**.

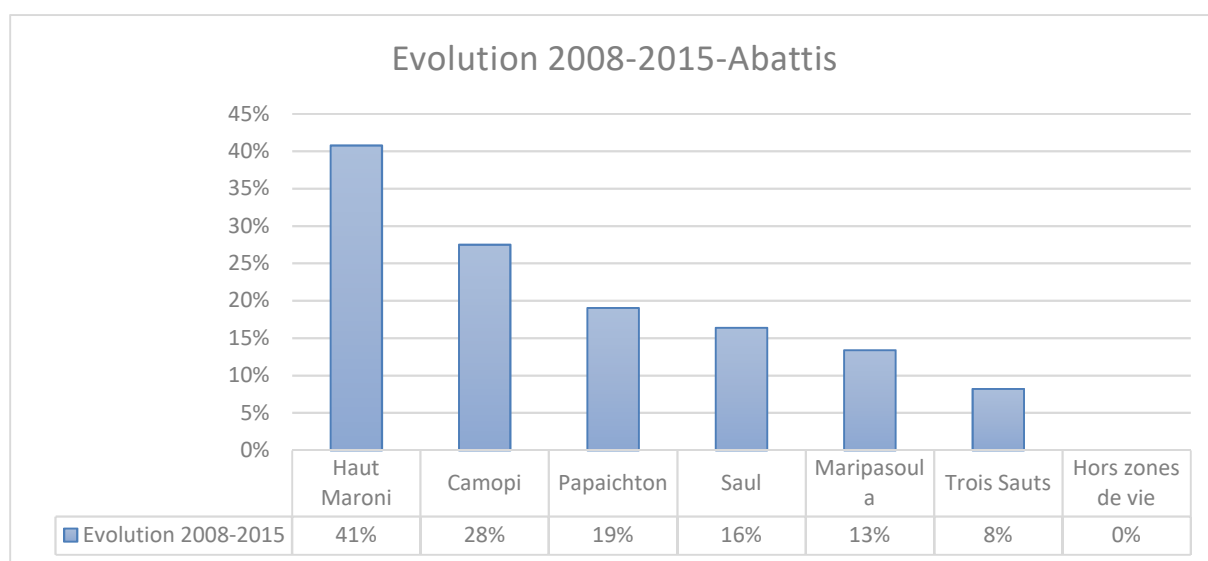


Figure 17 : Evolution de la surface d'abattis entre 2008 et 2015 par rapport à la surface d'abattis en 2008 (ha) par commune

Les plus fortes dynamiques sont enregistrées sur le Haut-Maroni où la surface d'abattis a presque doublé en 7 an (+ 41%), sur Camopi où elle a augmenté d'un tiers (+28%) et Papaïchton où elle a augmenté de 1/5 (19%). Les surfaces d'abattis de Maripasoula augmentent, mais proportionnellement parlant, la dynamique de croissance est moins forte que sur les autres territoires. Par ailleurs, il est fort probable que les surfaces d'abattis anciens soient régulièrement remises en culture sur Maripasoula afin de rester à proximité des habitations et des voies d'accès (moins de contraintes)<sup>5</sup>. Cette donnée ne peut toutefois pas être vérifiée avec les données actuelles d'AgriPag.

<sup>5</sup> Confirmation de cette hypothèse au CS du PAG

### 3.1.3.2 CSE 3.2 : Abattis itinérant à cycle court

#### a) Description du CSE

Très similaire au CSE précédent, le contexte socio-environnemental de l'abattis itinérant à cycle court diffère du fait qu'il y a une remobilisation précoce de l'abattis (jachère de 2 à 3 ans) et donc un cycle sur 5-6 ans. Un des avantages de raccourcir le cycle réside notamment dans l'opération de défriche. La jachère étant raccourcie, la végétation implantée est plutôt de type herbacée et peu ligneuse et la défriche est donc plus aisée. Il est aussi plus facile de détourner les fruitiers éventuellement laissés sur place afin d'améliorer leur productivité à très court terme. Le brulis du matériau herbacé est par ailleurs plus rapide que sur du matériau ligneux. Toutefois, cette pratique intensive de l'abattis risque d'appauvrir la fertilité des sols par épuisement.

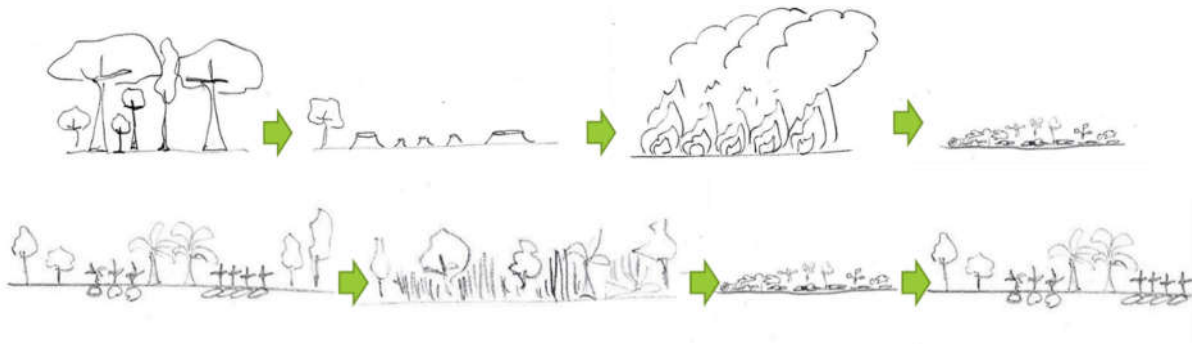
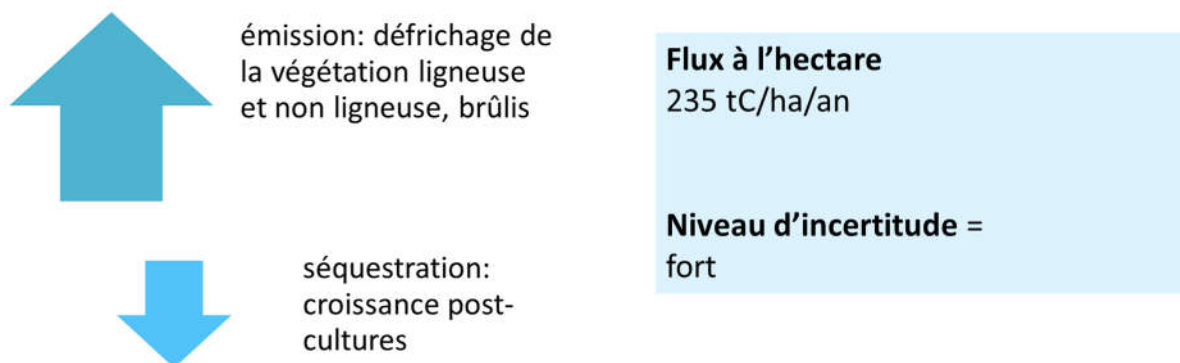


Figure 18 : schéma du CSE 3.2 - abattis itinérant à cycle court (jachère courte)

#### b) Hypothèse de calcul des stocks initiaux et finaux pour établir le bilan global



Le bilan entre perte initiale de biomasse lors de l'abattis et le gain lors de la repousse dépend du temps de retour de l'abattis sur une même parcelle, donc du temps de jachère. Selon ce paramètre, entre 5 ans et 6 ans, et avec une hypothèse de reconstitution du stock théorique au bout de 30 ans, on peut considérer les hypothèses suivantes :

- Perte de biomasse de 80% pour les cycles courts de quelques années (3 à 7 ans), et perte de 50% du stock de sol

Selon cette hypothèse on estime les flux à 235 tC/ha/an.



### c) Estimation des surfaces

Il n'existe pas de catégorie spécifique dans AgriPag pour pouvoir traiter cette donnée spécifiquement par rapport au CSE précédent. Ainsi, un échantillonnage a été réalisé sur Maripasoula. Toutes les années entre 2008 et 2015 sont affichées avec une transparence à 30% des couches. On n'affiche que les « abattis frais ». Un abattis frais repassant en abattis frais au court des 7 années écoulées témoigne d'une mise en jachère courte. Toutes les surfaces constatées sont détournées manuellement une à une. Il s'avère que sur Maripasoula, 4% du territoire repasse en abattis itinérant rapide (catégorie « abattis frais ») entre 2008 et 2015. Si on extrapole ce ratio de 4% à l'ensemble des abattis des territoires, il s'avère qu'en 2008 il y aurait 282 ha d'abattis en abattis rapide, 332 ha en 2015, donc une augmentation de 50ha en 7 ans soit **7ha/an** en plus.

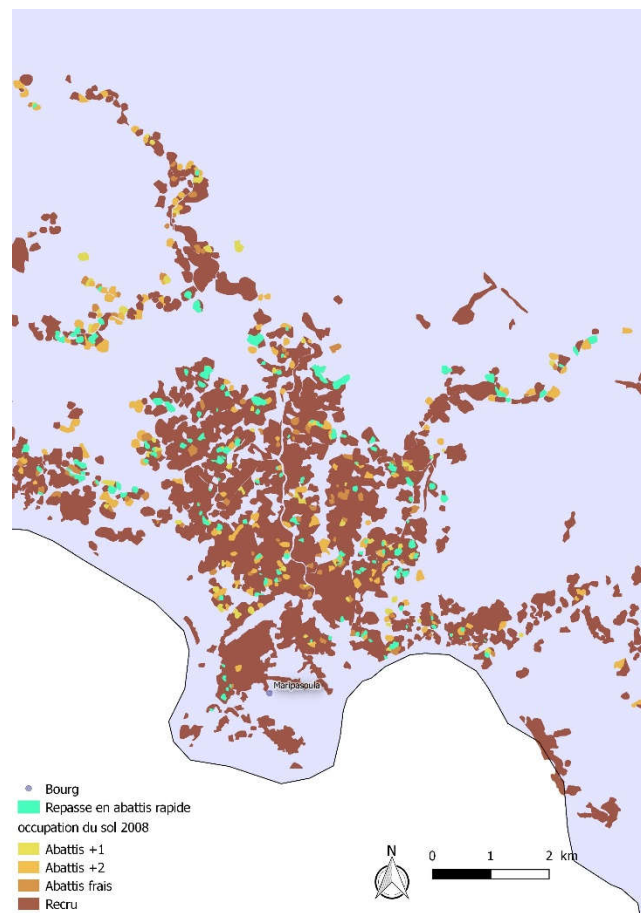


Figure 19 : Zoom sur Maripasoula, des abattis itinérants rapides (4% - affichés en bleu turquoise)

### d) Limites

Au vu des tendances constatées, à dire d'expert terrains (agents PAG) ce CSE était intéressant à étudier étant donné qu'il semblerait que la pratique serait à l'intensification des jachères (tendance confirmée à dire d'expert su Conseil scientifique du PAG) et de plus en plus généralisée à l'ensemble des territoires du PAG. Les données se basent sur AgriPag qui fait une analyse par interprétation des ortho-photos. Il peut y avoir un premier biais d'interprétation. Par ailleurs seul un échantillonnage a été fait par SIG sur Maripasoula. Il serait intéressant de faire l'analyse sur les autres territoires.

A dire d'expert du CS du PAG, il semble toutefois que de dire que 4% des abattis repassent en cycle rapide soit une sous-estimation très importante du phénomène et pratiques agricoles constatées sur le terrain. La donnée actuellement disponible est a priori trop peu robuste pour pouvoir confirmer le résultat de l'abattis itinérant à cycle court. **Ce CSE est donc à abandonner pour privilégier l'analyse affinée du CSE 3.1.**

### e) Bilan Abattis itinérant

Au vu de la faible robustesse de l'analyse des surfaces pour les abattis à cycle rapide (CSE 3.2), on n'utilise pour le calcul du bilan que la valeur du **CSE 3.1 à savoir 180 ha/an** qui comptabilise la surface totale en abattis, tout cycle d'abattis confondu.

Toutefois, on estime une fourchette basse à 112 tC/ha/an selon les estimations du CSE 3.1 (abattis traditionnel cycle long) et une fourchette haute à 235 tC/ha/an selon les estimations du CSE 3.2 (abattis à cycles rapide)

On calcule ainsi le bilan :

	<b>CSE 3</b>	
	Abattis itinérant	
	<i>fourch. basse</i>	<i>fourch. haute</i>
Stock initial (tC/ha)	331	331
<i>Dont biomasse</i>	231	231
<i>Dont sol</i>	100	100
Evolution stock biom. %	-40%	-80%
Evolution stock sol %	-20%	-50%
Stock final (tC/ha)	218,6	96,2
Flux (tC/ha/an)	112	235
Surface (ha/an)	180	180
Bilan PAG (tC/an)	20232	42264
Bilan PAG (tCO <sub>2</sub> /an)	74184	154968
Ordre de grandeur (tCO <sub>2</sub> /an)	<b>74000</b>	<b>155 000</b>

Figure 20 : Bilan CSE 3 abattis itinérant (cycle variable)

Le bilan du CSE 3 – abattis itinérant est donc une compilation des hypothèses de l'abattis traditionnel et de l'abattis rapide avec les surfaces uniquement de l'abattis traditionnel (180 ha/an). **Le bilan s'élève donc entre 74 000 et 155 000 tCO<sub>2</sub>/an à l'échelle du PAG. Ce secteur est donc très émetteur au vu des surfaces concernées.**

### *f) Perspectives d'amélioration*

La mise en culture de l'abattis suit une dynamique complexe tout particulièrement sur le temps de jachère et les diverses rotations. Les hypothèses du modèle actuel pourraient être affinées suite à la récolte de données supplémentaires suivantes :

- Préciser le type de cultures (fruitier, tubercules...) qui peut influencer sur la séquestration carbone du système agricole développé
- Préciser les temps de mise en jachère, car la tendance serait plutôt au raccourcissement de la jachère entre 5 et 7 ans, impliquant un cycle non pas de 15 ans mais de 9 à 11 ans avec 3 ans de mise en culture et 1 an de défriche. Une réflexion sur l'optimisation carbone de ce système pourrait être menée
- Préciser s'il y a des différences entre les territoires sur ces temps de jachères et comprendre les facteurs qui influencent ces choix
- Préciser le mode opératoire de la mise en culture, ce qui permettrait d'estimer plus finement la dynamique et les flux (restockage notamment) selon le temps de jachère des abattis et le type de jachère (friche herbacée en raison d'un épuisement des sols ou restructuration précoce d'une forêt secondaire). Peut-être que le brûlis sur une repasse d'abattis est plus rapide et ne cible que les herbacées sans toucher les ligneux en place (notamment les fruitiers). Il y aurait alors une capitalisation carbone plus importante que dans les hypothèses actuellement prises en compte. Si toutefois le terrain est totalement brûlé à chaque repasse, on reperd le (faible) gain et on ne capitalise jamais sur le recru. Dans ce cas on a une perte initiale nette et donc un bilan zéro à chaque repasse quelque soit le type de jachère (ligneuse ou pas).

### 3.1.4 CSE 4 : Orpaillage

#### a) Description du CSE

Il s'agit de la pratique de l'exploitation aurifère pratiquée de manière légale ou illégale qui engendre une dégradation du couvert forestier et de son sol. Dans ce cas, la majorité de la biomasse est perdue par émission vers l'atmosphère suite à son brûlis ou la décomposition du bois mort et de la litière. Le sol est remanié pour en extraire l'or ce qui engendre des émissions carbone. Le temps de reprise de la végétation est long car le sol est fortement pollué.

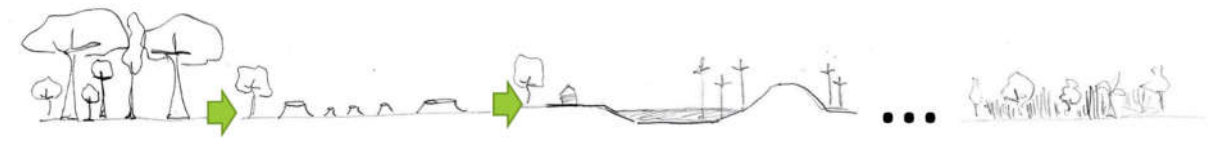
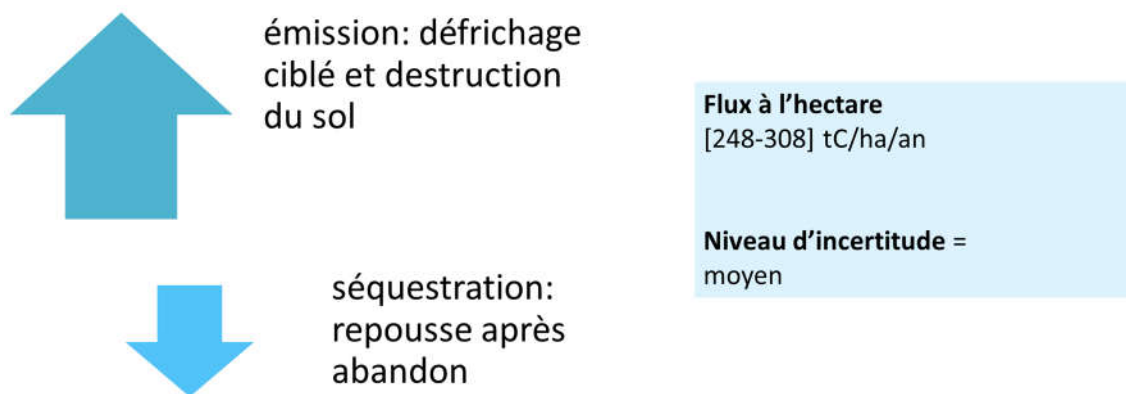


Figure 21 : schéma du CSE 4 - orpaillage

#### b) Hypothèse de calcul des stocks initiaux et finaux pour établir le bilan global



On estime en fourchette basse que 75% des stocks de biomasse et du sol initiaux disparaissent au court du cycle et en fourchette haute on estime respectivement à 90% et 100% de disparition des stocks initiaux de la biomasse et du sol.

#### c) Estimation des surfaces

Les données recensant la déforestation liée à des activités minières ont été compilées par le WWF à partir d'une analyse orthophoto sur les années 2000, 2008, 2014 et 2015. Afin d'avoir une cohérence d'analyse pour l'ensemble des données traitées, nous retenons les années 2008 et 2015 soit une annualisation moyenne sur 7 ans. La donnée orpaillage recense essentiellement la pratique de l'extraction de l'or alluvionnaire. L'or primaire utilise une technique proche du forage en profondeur et n'aura donc que peu d'impact en termes de surfaces (donnée confirmée par Pierre Joubert). La donnée AgriPag n'a pas été utilisée pour cette analyse étant donné qu'elle est moins englobante que celle compilée par le WWF.

La donnée utilisée comptabilise uniquement la surface forestière impactée (déboisement et/ou exploitation des zones de flat, zones de logistique...) et non la surface de la concession minière ou

périmètre d'exploitation. La donnée n'est pas territorialisée comme dans AgriPag et donc l'analyse ne peut se faire qu'à l'échelle de l'ensemble du territoire du PAG.

En 2008 on estime à 3 792 ha la surface d'exploitation aurifère et en 2015 à 4 003 ha, soit une augmentation de 210 ha en 7ans (**30ha/an**).

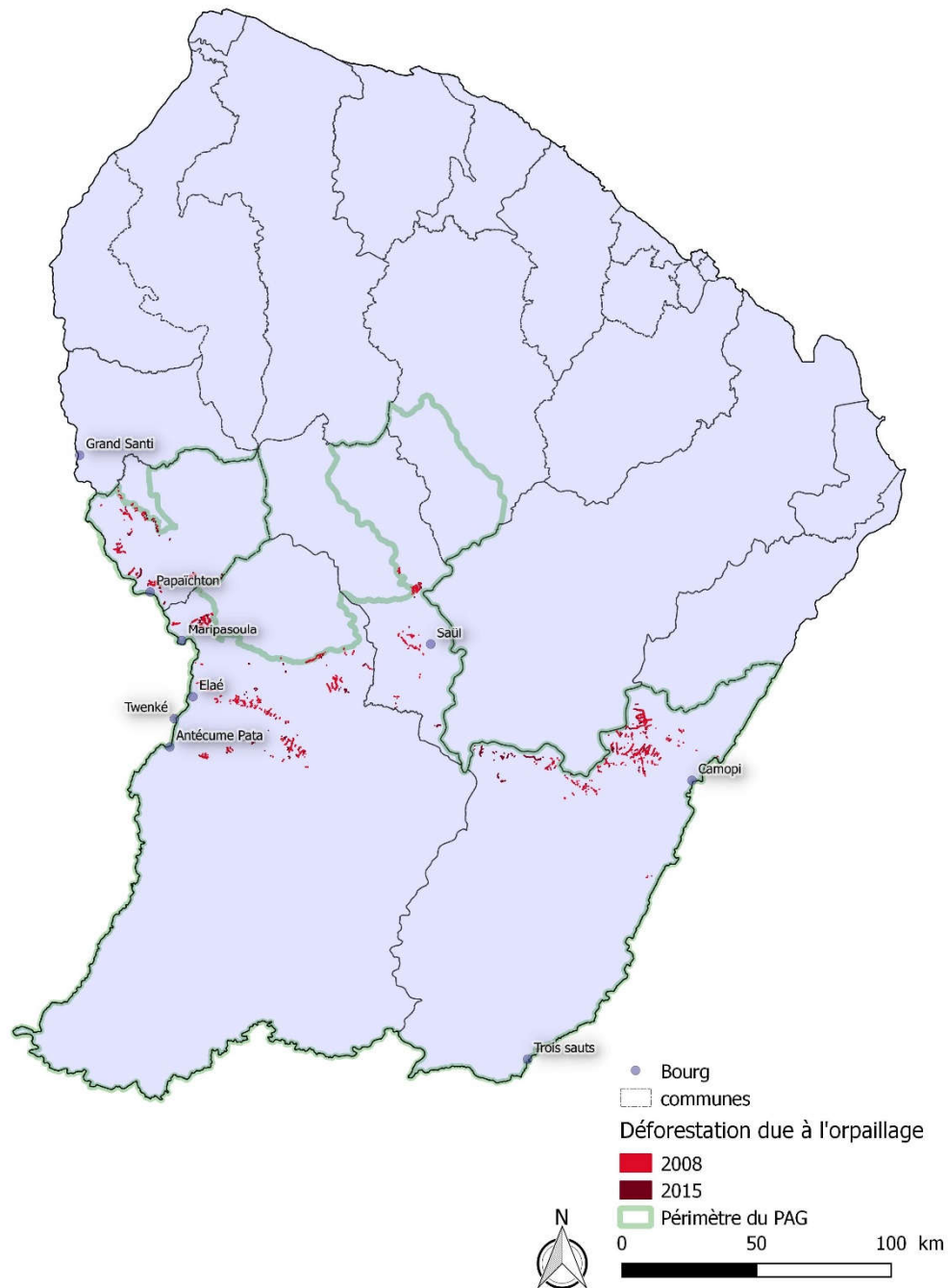


Figure 22 : Sites d'extraction aurifères au sein du PAG impactant le couvert forestier en 2015, à l'échelle du PAG

#### d) Bilan

On estima ainsi le bilan :

	CSE 4	
	orpaillage	
	<i>fourch. basse</i>	<i>fourch. haute</i>
Stock initial (tC/ha)	331	331
<i>Dont biomasse</i>	231	231
<i>Dont sol</i>	100	100
Evolution stock biom. %	-75%	-90%
Evolution stock sol %	-75%	-100%
Stock final (tC/ha)	82,75	23,1
Flux (tC/ha/an)	248	308
Surface (ha/an)	30	30
Bilan PAG (tC/an)	7448	9237
Bilan PAG (tCO2/an)	27308	33869
Ordre de grandeur (tCO2/an)	<b>27000</b>	<b>34000</b>

Figure 23 : Bilan CSE 4 Orpaillage

Le bilan est donc estimé entre 27 000 et 34 000 tCO2/an selon l'hypothèse prise. Ce secteur est fortement émetteur rapporté à l'hectare ([248 – 308] tC /ha/an).

#### e) Perspectives d'amélioration

La donnée sur l'orpaillage et sa géolocalisation est une donnée sensible. Il serait toutefois intéressant de faire une analyse par zonage afin de pouvoir territorialiser cette donnée.

La donnée actuellement traitée ne permet pas de faire la différence entre l'orpaillage légal et illégal. Il serait nécessaire de connaître l'ensemble des sites légaux et par déduction de pouvoir extraire l'impact des sites illégaux. La donnée de géolocalisation des sites illégaux est très probablement existante mais sûrement confidentielle.

La précision des différents types de zones (flats, plateforme logistique, zone déforestée de bordure...) et leurs dynamiques de recru respective permettrait d'affiner le modèle de reséquestration carbone et de calculer ainsi les flux pour chaque type de compartiment.

On note toutefois que cette analyse ne tient pas compte du bilan carbone de l'exploitation aurifère qui est fortement dépendante des énergies fossiles pour l'alimentation des engins et matériels (groupes électrogènes, engins de chantier). Les sites étant isolés, le carburant est alors le plus souvent transporté du littoral vers les sites de l'intérieur et donc ont un impact fort en termes de « coût carbone » de cette activité. Une analyse complémentaire pourrait être menée pour préciser l'impact de cette activité en termes d'émission carbone et non pas uniquement en termes d'impact carbone forestier comme il est fait dans la présente analyse.

### 3.1.5 CSE 5 : Déforestation pour mise en culture pérenne

#### a) Description du CSE

Bien que le mode d'agriculture déployé sur le territoire du PAG soit essentiellement celui de l'abattis, il existe quelques agriculteurs qui tendent à en faire une activité commerciale (professionnalisation) avec des ventes régulières de leurs productions. Les cultures mises en place sont donc plutôt des cultures pérennes sur des surfaces non itinérantes. Il s'agit essentiellement de maraîchage/arboriculture et un peu d'élevage. La mise en valeur initiale du terrain est similaire au CSE 3 et 4 puisqu'il se fait par abattis – brulis. Toutefois les cultures sont pluriannuelles et il n'y a pas de jachère.

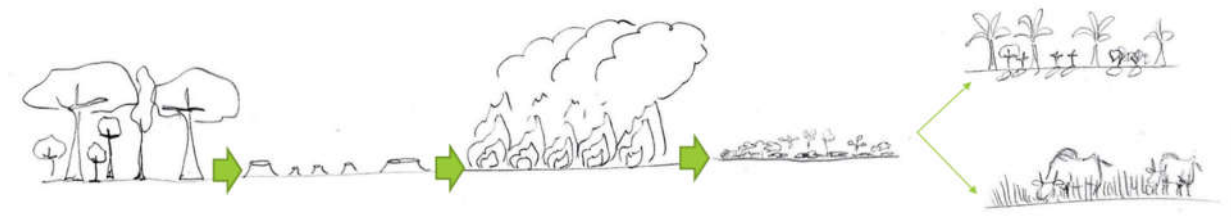
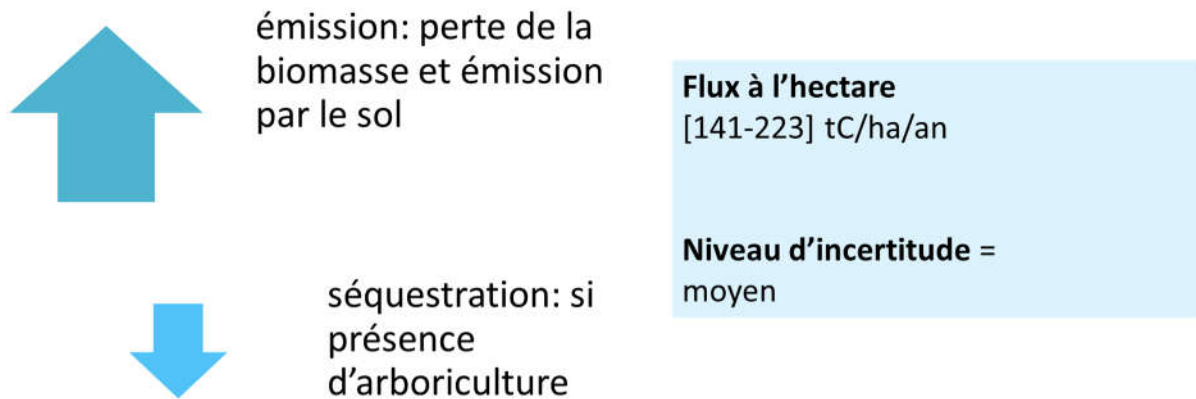


Figure 24 : Schéma du SCE 5 - déforestation pour une agriculture pérenne

#### b) Hypothèse de calcul des stocks initiaux et finaux pour établir le bilan global



A partir du stock initial à l'équilibre de 331 tC/ha, dont 231 tC/ha dans la biomasse et 100 tC/ha dans le sol, on applique les hypothèses suivantes :

- Perte du stock initial de carbone organique du sol entre -25% et -50%, le sol perdant son équilibre forestier, la plupart de ces apports étant perdu au profit de nouveaux apports (résidus de culture, fertilisation minérale et organique) et le travail du sol et la perte de couverture arborée entraînant un destockage ;
- Perte du stock de biomasse entre -50% et -75%, compte tenu du maintien de certains arbres et de la compensation de la perte d'autres arbres par la croissance de cultures pérennes.

### c) Estimation des surfaces

Ce Contexte socio-économique ne concerne que deux communes à savoir Maripasoula et Saül. Les données sont issues de la catégorie « agriculture fixe » d'AgriPag. Il s'avère que la surface a doublé sur Maripasoula passant de 30 à 64 ha. Elle augmente d'un tiers sur Saül passant de 60 à 77ha.

L'augmentation totale à l'échelle du PAG est donc de 51 ha en 7 ans (90 ha en 2008 et 141 ha en 2015), soit une **augmentation annuelle de 7 ha**.

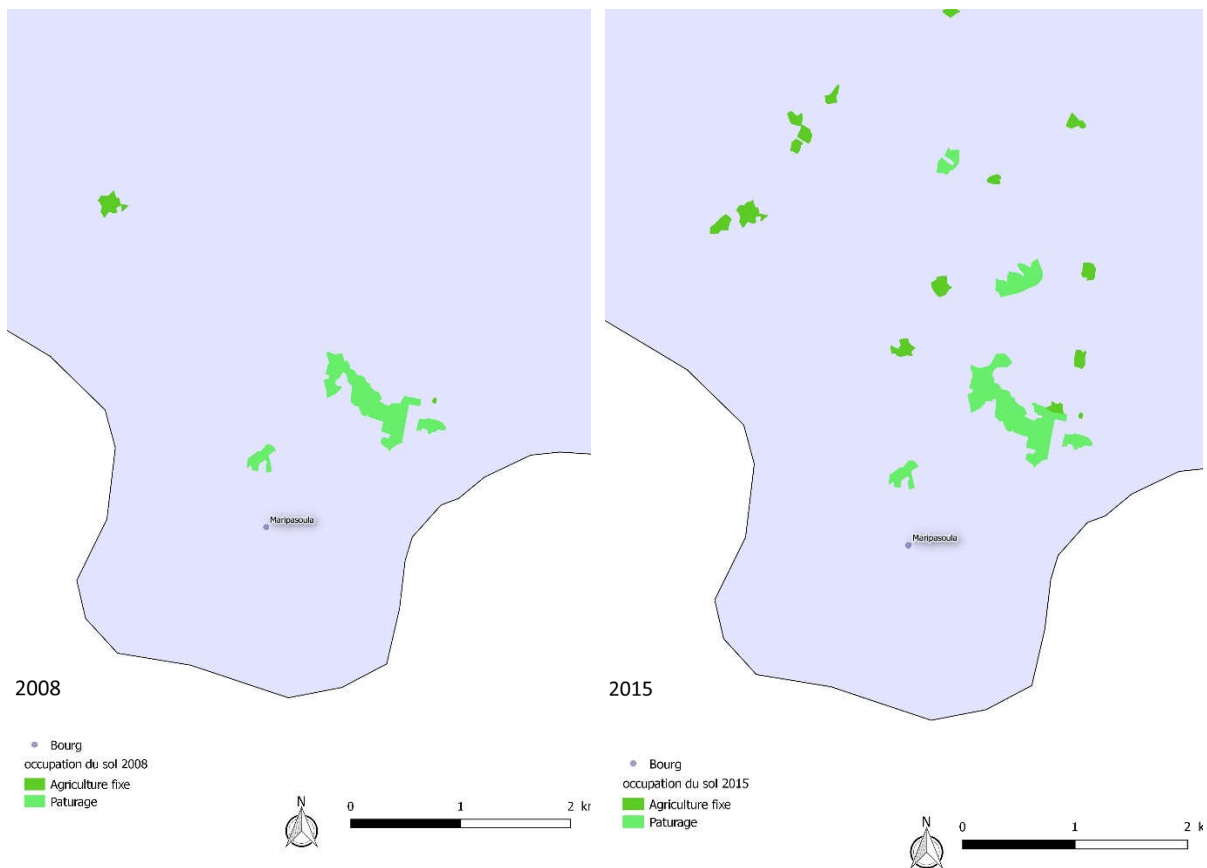


Figure 25: Zoom sur les surfaces en agriculture pérenne sur la Commune de Maripasoula en 2008 et 2015



#### d) Bilan

On estime ainsi le bilan :

	CSE 5	
	déforestation pour mise en culture	
	<i>fourch. basse</i>	<i>fourch. haute</i>
Stock initial (tC/ha)	331	331
Dont biomasse	231	231
Dont sol	100	100
Evolution stock biom. %	-50%	-75%
Evolution stock sol %	-25%	-50%
Stock final (tC/ha)	190,5	107,75
Flux (tC/ha/an)	141	223
Surface (ha/an)	7	7
Bilan PAG (tC/an)	1036	1646
Bilan PAG (tCO2/an)	3799	6036
Ordre de grandeur (tCO2/an)	<b>4000</b>	<b>6000</b>

Figure 26 : Bilan CSE 5 Déforestation pour mise en culture pérenne

Associé à des surfaces de plus de 7ha/an (voir ci-dessous), le flux total pour le PAG est ainsi estimé dans une fourchette allant d'un ordre de grandeur de **4000 à 6000 tCO2/an, soit 5000 tCO2/an en moyenne en fonction du scénario de culture.**

#### e) Perspectives d'amélioration

Il existe actuellement peu de référence sur les pratiques agricoles d'un mode d'exploitation pérenne, de même que sa dynamique à l'échelle du territoire. Il semblerait qu'il y aurait 30 ha à Papaïchton (sources coms pers agent PAG) mais nous ne disposons pas de la donnée de 2008 et 2015 sur Papaïchton nous permettant d'intégrer ce résultat au même titre que les données traitées.

Les données de la SAU issues du recensement parcellaire graphique (DAAF) devrait permettre dans les prochaines années d'avoir une donnée plus précise d'autant que ce recensement est de mieux en mieux déployé sur le territoire par la DAAF et la Chambre d'agriculture.

### 3.1.6 CSE 6 : Déforestation pour usage non-agricole

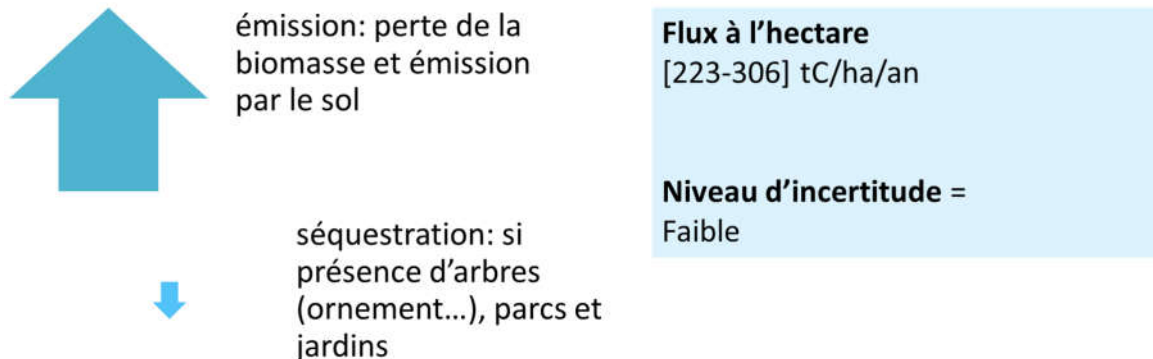
#### a) Description du CSE

Il s'agit des cas où l'espace boisé est converti en espace d'habitation ou d'infrastructure urbaine (route...) ou considéré comme telle. Dans ce cas la totalité de la biomasse est perdue, mais pas forcément immédiatement (passage vers le bois mort ou les produits bois), et le stock du carbone du sol diminue aussi très fortement. Ce ne sont toutefois pas forcément des surfaces bétonnées, mais on considère qu'il n'y a pas de recru végétal dessus, et qu'il y a une artificialisation du sol (donc plus de respiration possible ou alors très faible et considérée comme quasi nulle).



Figure 27 : SCE 6 Déforestation pour un usage non agricole

#### b) Hypothèse de calcul des stocks initiaux et finaux pour établir le bilan global



A partir du stock initial à l'équilibre de 331 tC/ha, dont 231 tC/ha dans la biomasse et 100 tC/ha dans le sol, on applique les hypothèses suivantes :

- Perte du stock initial de carbone organique du sol entre -50% et -75%, la perte de couverture arborée entraînant un fort destockage ;
- Perte du stock de biomasse entre -75% et -100%, on considère qu'il y a une destruction quasi-totale de la couverture biomasse aérienne.

### c) Estimation des surfaces

L'estimation des surfaces se base sur les catégories d'AgriPag suivantes :

- Aéroport
- Emprise de voirie
- Habitat diffus
- Habitations
- Sol nu

On estime qu'en 2008 les surfaces « artificialisées » étaient de 1080 ha, passant à 1210 ha en 2015. Il y a donc une augmentation de 130 ha à l'échelle du PAG soit **19 ha/an**.



Figure 28 : Surfaces artificialisées à l'échelle du PAG en 2015

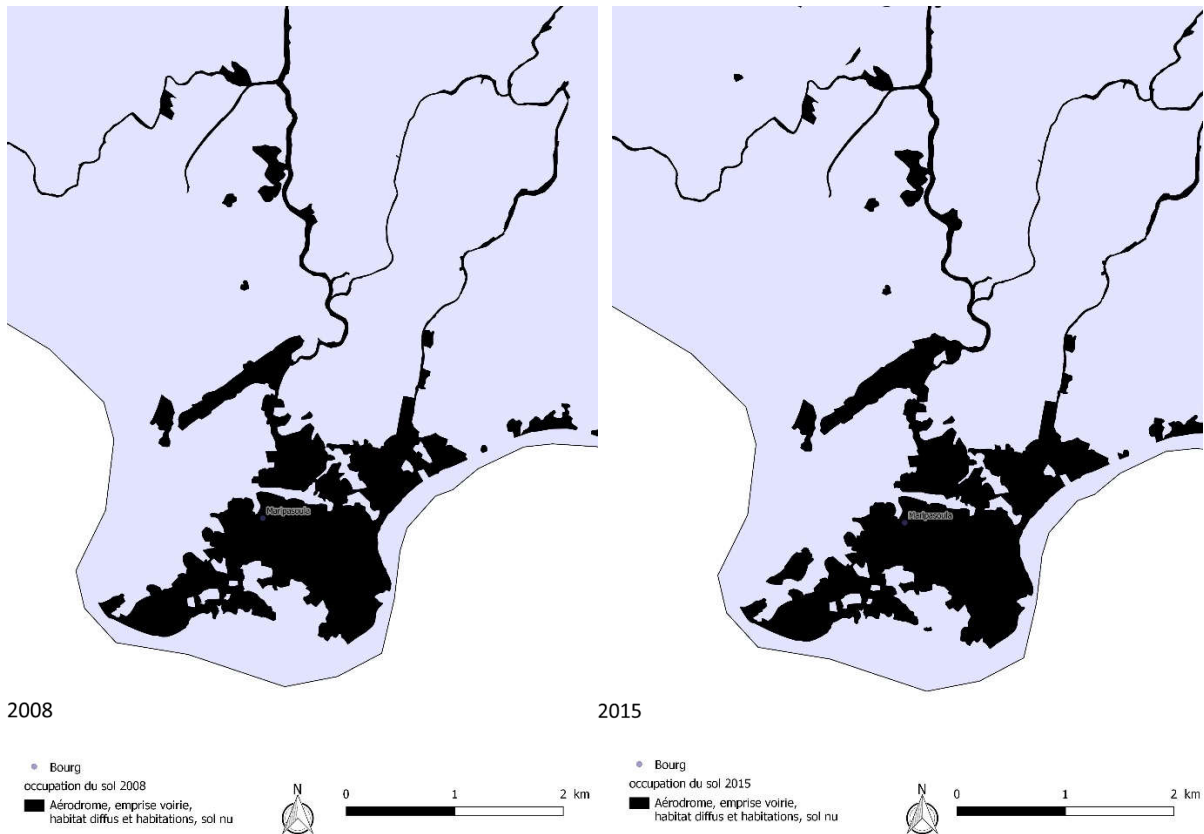


Figure 29 : Zoom sur les surfaces artificialisées sur la Commune de Maripasoula en 2008 et 2015

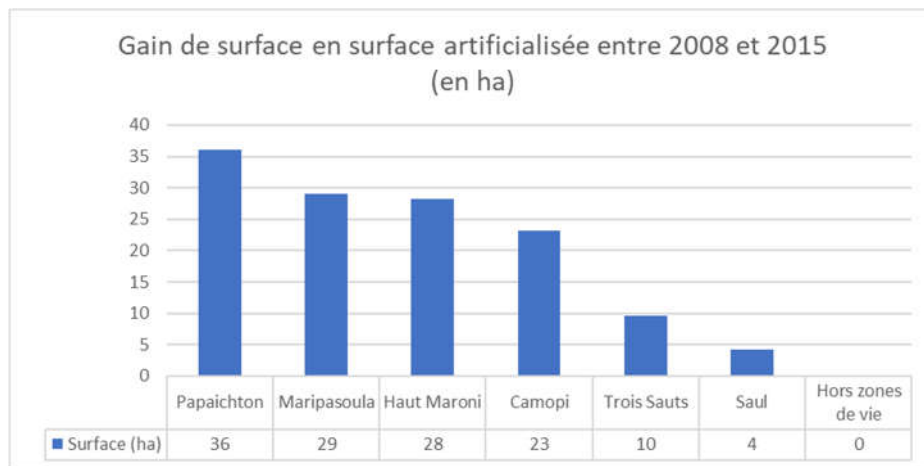


Figure 30 : Gain en surface artificialisée ente 2008 et 2018 (en ha) - valeur nette

Papaïchton est la commune qui gagne le plus en terrain « artificialisé » entre 2008 et 2015 avec une augmentation de 36 ha devant Maripasoula (29ha) et le Haut Maroni (28 ha). Cette tendance peut s'expliquer du fait de la forte poussée démographique que connaît Papaïchton qui engendre un besoin infrastructurel important.

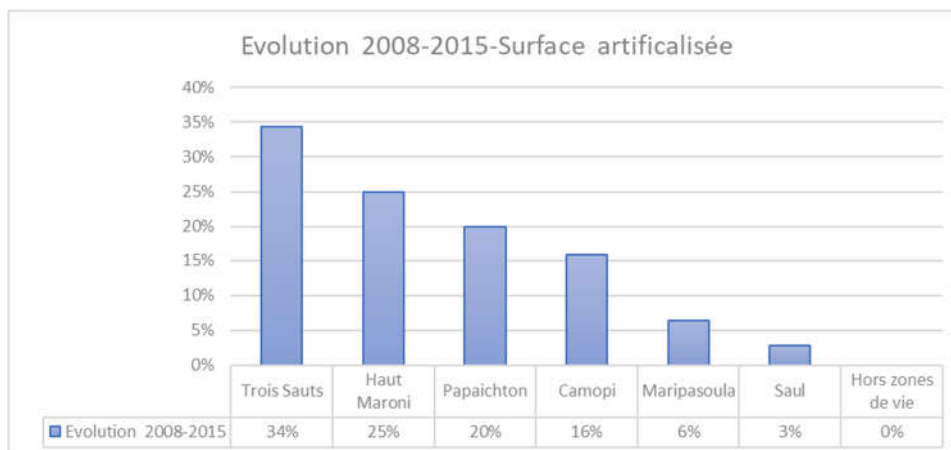


Figure 31 : Evolution de la surface artificialisée entre 2008 et 2015 par rapport à 2008

Avec 10 ha en plus, Trois Saut est le territoire qui augmente le plus sa surface artificialisée par rapport à 2008. Cela représente une augmentation d'un tiers (30%). Le Haut Maroni s'artificialise à 25% par rapport à 2008 et Papaïchton de 20%. Maripasoula connaît une faible artificialisation de son territoire entre 2008 et 2015 (6% d'augmentation).

#### d) Bilan

On estime ainsi le bilan :

	CSE 6	
	déforestation pour usage non-agricole	
	<i>fourch. basse</i>	<i>fourch. haute</i>
Stock initial (tC/ha)	331	331
<i>Dont biomasse</i>	231	231
<i>Dont sol</i>	100	100
Evolution stock biom. %	-75%	-100%
Evolution stock sol %	-50%	-75%
Stock final (tC/ha)	107,75	25
Flux (tC/ha/an)	223	306
Surface (ha/an)	19	19
Bilan PAG (tC/an)	4157	5698
Bilan PAG (tCO2/an)	15242	20891
Ordre de grandeur (tCO2/an)	<b>15000</b>	<b>21000</b>

Figure 32 : Bilan CSE 6 Déforestation pour usage non-agricole

Le flux total pour le PAG est ainsi estimé dans une fourchette allant d'un ordre de grandeur de

15 000 à 21 000 tCO2/an, soit 18 000 tCO2/an en moyenne.

#### e) Perspectives d'amélioration

Comme évoqué dans la description du CSE, on considère ici que les surfaces n'ont pas de couvert végétal. Or les habitations et habitats diffus ainsi que les emprises des voiries sont très souvent composées d'arbres ce qui aurait tendance à amoindrir l'effet « émetteur » du bilan de ces surfaces. Pour cela il faudrait créer des sous-catégories à l'échelle d'AgriPag. Le ratio « effort de précision de la donnée » est toutefois à évaluer par rapport à la plus-value apportée sur le bilan carbone global.

## 3.2 Synthèse

Le tableau suivant résume les différents flux annuels de C, exprimés d'abord en tC/ha/an ; puis en tCO2/ha/an.

### Contexte socio-environnemental

	CSE 1		CSE 2		CSE 3		CSE 4		CSE 5		CSE 6	
	Forêt mature sans récoltes		Forêt mature avec récoltes		Abattis itinérant		Orpaillage		Déforestation pour mise en culture pérenne		Déforestation pour usage non-agricole	
	<i>fourch. basse</i>	<i>fourch. haute</i>	<i>fourch. basse</i>	<i>fourch. haute</i>	<i>fourch. basse</i>	<i>fourch. haute</i>	<i>fourch. basse</i>	<i>fourch. haute</i>	<i>fourch. basse</i>	<i>fourch. haute</i>	<i>fourch. basse</i>	<i>fourch. haute</i>
Stock initial (tC/ha)	331	331	331	331	331	331	331	331	331	331	331	331
<i>Dont biomasse</i>	231	231	231	231	231	231	231	231	231	231	231	231
<i>Dont sol</i>	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Evolution stock biom. %	0	0	n.c	n.c	-40%	-80%	-75%	-90%	-50%	-75%	-75%	-100%
Evolution stock sol %	0	0	n.c	n.c	-20%	-50%	-75%	-100%	-25%	-50%	-50%	-75%
Stock final (tC/ha)	331	331	n.c	n.c	218,6	96,2	82,75	23,1	190,5	107,75	107,75	25
Flux (tC/ha/an)	0	0	n.c	n.c	112	235	248	308	141	223	223	306
Surface (ha/an)	3358044	3358044	-	-	180	180	30	30	7	7	19	19
Bilan PAG (tC/an)	0	0	720	1104	20232	42264	7448	9237	1036	1646	4157	5698
Bilan PAG (tCO2/an)	0	0	2641	4050	74184	154968	27308	33869	3799	6036	15242	20892
Ordre de grandeur (tCO2/an)	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3000</b>	<b>4000</b>	<b>74000</b>	<b>155 000</b>	<b>27000</b>	<b>34000</b>	<b>4000</b>	<b>6000</b>	<b>15000</b>	<b>21000</b>

Le CSE 3 « abattis itinérant » est le plus émetteur en carbone en raison de la surface touchée par an (180 ha). Le deuxième CSE le plus impactant étant l'orpaillage du fait des flux émis en raison de la destruction totale de biomasse et du remaniement du sol, bien que la surface impactée soit six fois moindre que pour le CSE 3. Les Contextes les plus émetteurs en termes de flux à l'hectare sont le CSE 4-orpaillage [248-308] tC/ha/an et le CSE 6 – déforestation pour usage non agricole [223-306] tC/ha/an. Ces deux derniers ont en effet un fort impact sur la diminution de la biomasse aérienne, mais aussi sur la mobilisation du carbone du sol (mise à nu).

A l'échelle du PAG, on compte donc une émission de l'ordre de 171 500 tCO2/an [123 000 – 220 000], soit 0,172MtCO2/an.

## 5. Recommandations et mise en perspectives

Le PAG est une source d'émission de GES par son fonctionnement à 0,00063 Mt CO<sub>2</sub>e en 2016 (estimé d'après le bilan de GES réalisé en parallèle de la présente étude), et au niveau de l'utilisation des terres et de la forêt (UTCATF), 0,172 Mt CO<sub>2</sub>/an environ. Ce bilan d'émission est donc très fortement affecté par la prise en compte du secteur UTCATF. Ce résultat est toutefois encore très dépendant du manque de certitude sur le bilan (émetteur ou puit) de la forêt mature sans récolte (CSE 1).

Néanmoins, le bilan de la Guyane dans son intégralité repose lui aussi sur cette même hypothèse de neutralité carbone de la forêt mature sans récolte. Ce bilan guyanais (qui intègre le PAG) comprend 1,1 Mt CO<sub>2</sub>e/an d'émissions hors UTCATF et **3,6 Mt CO<sub>2</sub>/an d'émissions dues au secteur UTCATF** à lui seul (chiffres valables pour 2015, issus de l'inventaire Outre-Mer du Citepa).

On constate donc que le PAG, même s'il représente environ 40% de la surface guyanaise, représente moins de **1% des émissions hors UTCATF** de la Guyane et **5% des émissions du secteur UTCATF**.

	Emissions GES hors UTCATF (en MT CO <sub>2</sub> e en 2016)	Emission GES UTCATF (en MT CO <sub>2</sub> /an)
Guyane	1,1	3,6
PAG	0,00063	0,172
Responsabilité du PAG	0,057%	5%

A titre de comparaison, les émissions totales de la France s'élèvent à **445 Mt CO<sub>2</sub>e en 2016** (hors UTCATF) et l'UTCATF représente un **puits d'environ -40 Mt CO<sub>2</sub>/an** lié principalement à la croissance de la forêt métropolitaine, suivie depuis des dizaines d'années par l'inventaire forestier national.

La prise en compte du carbone dans les pays limitrophes devient de plus en plus prioritaire face aux enjeux du changement climatique. Les mécanismes du protocole de Kyoto (MDP pour les pays de l'annexe 2), REDD+ ou encore les mécanismes de marché carbone volontaire ont permis de faire émerger des initiatives pour trouver des scénarii alternatifs et diminuer les émissions carbone notamment due à la déforestation.

L'**Amapa** envisage de mettre en place des projets REDD+ puisque le Brésil est éligible. Le Brésil a mis en place depuis les années 1990 un MDP<sup>6</sup> avec le projet Peugeot au Mato Grosso.

**Au Suriname**, la Banque Mondiale a validé en 2013 la Proposition pour la Préparation à la REDD+ (RPP)

**Le Guyana** a mis en place un **partenariat avec la Norvège** visant à créer des **incitations financières** pour la préservation des forêts du Guyana. Ce système se base sur les **services écosystémiques rendus par la forêt**. Le Guyana calcule le coût d'opportunité pour l'Etat de laisser sa forêt sur pied (prix plancher), mais aussi ce que perdrait le monde si le Guyana coupait sa forêt (prix plafond). En 2009, le Guyana signe un accord, jusqu'à **250 millions de \$ sur 5 ans (2010-2015)**. L'accord est toutefois basé sur un scénario initial nettement inférieur aux prédictions de développement du Guyana. D'après les Autorités guyaniennes l'enveloppe qu'elles auraient dû toucher pour éviter la déforestation aurait due être bien plus élevée pour compenser la restriction de développement du pays.

---

<sup>6</sup> Mécanisme de Développement Propre (protocole de Kyoto)

## Annexe 5 : Bibliographie

- Baccini, A., Walker, W., Carvahlo, L., Farina, M., Sulla-Menashe, D., & Houghton, R. (2017). Tropical forests are a net carbon source based on new measurements of Gain and Loss. *Science*, 10.1126/science.aam5962.
- Brienen, R. J. W., Phillips, O. L., Feldpausch, T. R., Gloor, E., Baker, T. R., Lloyd, J., ... & Martinez, R. V. (2015). Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, 519(7543), 344-348.
- Chave, J., Riéra, B., & Dubois, M. A. (2001). Estimation of biomass in a neotropical forest of French Guiana: spatial and temporal variability. *Journal of Tropical Ecology*, 17(1), 79-96
- Fauset S, Johnson MO, Gloor M, Baker TR, Monteagudo M A, et al. (2015) Hyperdominance in Amazonian forest carbon cycling. *Nat Commun* 6.
- Feldpausch TR, Banin L, Phillips OL, Baker TR, Lewis SL, et al. (2011) Height-diameter allometry of tropical forest trees. *Biogeosciences* 8: 1081-1106.
- Goulamoussene, Y. 2016. Variation et structure de la canopée en forêt tropicale humide. Apport de la très haute résolution spatiale en Guyane Française. Thèse de doctorat, Université Antilles Guyane, sous la direction de Bruno Héroult (CIRAD, UPR F&S) et Laurent Linguet.
- Guitet S, Blanc L, Chave J., Gomis A., 2006. Expertise sur les références dendrométriques nécessaires au renseignement de l'inventaire national de gaz à effet de serre pour la forêt guyanaise. Convention n° 59.02. G 18 / 05 du 19/12/2005 entre le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche et l'Office National des Forêts Direction régionale de Guyane. Rapport final, 81p.
- Guitet S, Pithon S, Brunaux O, Jubelin G, Gond V (2012) Impacts of logging on the canopy and the consequences for forest management in French Guiana. *Forest Ecology and Management* 277: 124-131.
- Guitet, S., Héroult, B., Molto, Q., Brunaux, O., & Coutron, P. (2015). Spatial structure of above-ground biomass limits accuracy of carbon mapping in rainforest but large scale forest inventories can help to overcome. *PLoS one*, 10(9), e0138456.
- Guitet, Stéphane & Cornu, Jean Francois & Betbeder, Julie & Carozza, Jean-Michel & Richard-Hansen, Cecile. (2013). Landform and landscape mapping, French Guiana (South America). *Journal of Maps*. 9. 325-335. 10.1080/17445647.2013.785371.
- Héroult, B., Beauchêne, J., Muller, F., Wagner, F., Baraloto, C., Blanc, L., & Martin, J. M. (2010). Modeling decay rates of dead wood in a neotropical forest. *Oecologia*, 164(1), 243-251.
- Johnson, M. O., Galbraith, D., Gloor, M., De Deurwaerder, H., Guimberteau, M., Rammig, A., ... & Phillips, O. L. (2016). Variation in stem mortality rates determines patterns of above-ground biomass in Amazonian forests: implications for dynamic global vegetation models. *Global change biology*, 22(12), 3996-4013.
- Lefebvre J.-P. et Verger G. 2014. Suivi de l'occupation du sol et des changements d'occupation du sol en Guyane française entre 1990 et 2012. MAAF, MEDDE, IGN, ONF, Rapport final, 30p.
- Malhi, Y., Aragao, L. E. O., Metcalfe, D. B., Paiva, R., Quesada, C. A., Almeida, S., ... & ANTONIO, C. (2009). Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. *Global Change Biology*, 15(5), 1255-1274.
- Mitchard ET, Feldpausch TR, Brienen RJ, Lopez-Gonzalez G, Monteagudo A, et al. (2014) Markedly divergent estimates of Amazon forest carbon density from ground plots and satellites. *Global Ecology and Biogeography*.
- Molto, Q. 2012. : Estimation des stocks de carbone en forêts tropicales humides : quels jeux de données pour quelle précision ? Thèse de doctorat, Université Antilles Guyane, sous la direction de Lilian Blanc.
- PAG, 2015 : Estimation du stock carbone sur le territoire du PAG. Les cahiers Scientifiques du Parc Amazonien de Guyane, 3p.
- PAG, 2017. Site internet du Parc. <http://www.parc-amazonien-guyane.fr>
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., ... & Ciais, P. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988-993.
- Pelissier, R., & Riéra, B. (1993). Dix ans de dynamique d'une forêt dense humide de Guyane Française.
- Phillips, O. L., Brienen, R. J., & RAINFOR collaboration. (2017). Carbon uptake by mature Amazon forests has mitigated Amazon nations' carbon emissions. *Carbon balance and management*, 12(1), 1.
- Stach N, Salvado A, Petit M, Faure J-F, Durieux L, et al. (2009) Land use monitoring by remote sensing in tropical forest areas in support of the Kyoto Protocol: The case of French Guiana. *International Journal of Remote Sensing* 30: 5133-5149.
- Townsend AR, Cleveland CC, Houlton BZ, Alden CB, White JWC (2011) Multi-element regulation of the tropical forest carbon cycle. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9: 9-17.