



Rapport d'étude :
Les Variables environnementales et la répartition spatiale de l'AGB, une approche locale pour une vision régionale en Guyane Française.

GUERRERE Vincent (2012)



Remerciements :

Je tiens à remercier particulièrement Lilian BLANC qui m'a laissé une grande liberté d'entreprise, et m'a permis de conjuguer mes travaux scolaires et mes travaux professionnels extérieurs.

Je tiens à remercier une partie des agents du CIRAD de Montpellier, qui ont su être de bons conseils et concourir à un transfert d'expérience riche, comme Vincent FREYCON sur les questions de fonctionnement des sols et sa connaissance très affûtée du site de Counami, comme Valeri GOND avec qui je partage les mêmes goûts pour la géomatique... mais également ceux qui m'ont retiré une épine douloureuse du pied à une période où j'en avais le plus besoin, je pense particulièrement à l'intervention de Nicolas FAUVET pour les images MODIS.

Je ne peux pas m'empêcher de remercier avec grande insistance une personne qui quitte le territoire, et le désarçonne de son puits de connaissance, je parle bien sûr de Stéphane GUITET de l'ONF. Cette personne est devenue avec le temps la personne ressource du milieu forestier Guyanais, tellement ressource qu'il était temps qu'il parte pour fuir les harcèlements des multiples stagiaires qui l'agrippent.

Je remercie Eric MARCON et Stéphane TRAISSAC pour leur joie de vivre communicative.

Je remercie mes colloques pour les bons moments passés, et les expéditions riches de souvenirs. Et Charles pour l'aide et la pédagogie dont il a fait preuve pour m'expliquer certaines théories mathématiques !

Je remercie de manière générale Ecofog pour ce stage, qui m'a permis de me former ou me perfectionner sur d'innombrables outils indispensables à un bon ingénieur agronome et forestier : R, ERDAS, ARCGIS, SAGA, ENVI ...

Et je remercie par-dessus tout, et sans équivoque, mon petit bout de femme, qui malgré les lourdes responsabilités qui lui incombent dans son poste à l'ONF, a toujours été d'un soutien merveilleux et d'une grande tolérance dans les multiples initiatives que j'ai entrepris en cette année mouvementée de 2011.

Vincent GUERRERE

Les opinions émises par les auteurs sont personnelles et n'engagent pas Agro-ParisTech.



Synoptique du travail effectué

Le sujet d'étude initial est : « **quelles variables environnementales sont susceptibles de pouvoir expliquer la répartition spatiale de l'AGB** ». De nombreux travaux dans le bassin Amazonien ne traitent que des effets de variables environnementales fines sur l'AGB (Above Ground Biomass), dans des dispositifs de taille réduite et souvent éloignés pour comparaisons. Suivant la logique de segmentation de la Guyane par la nouvelle carte des habitats, nous avons tenté d'expliquer la répartition spatiale de l'AGB en fonction de nombreuses variables environnementales à une méso-échelle, celle du massif de Counami (12 000 ha), ainsi qu'à l'échelle des stations du massif définies par une nouvelle segmentation géomorphologique (la topographie locale).

Ce travail central a nécessité la création d'outils nouveaux devant passer par des méthodologies de productions complexes. Ces travaux connexes portent également une grande importance pour la réalisation efficace de cette étude, et sont ainsi présentés en annexe. C'est donc quatre rapports techniques (RT) (deux écrits sous la forme d'une publication et deux sous la forme d'une note méthodologique) qui viennent agrémente cet écrit :

RT n°1 :

Le site de Counami est caractérisé par un dispositif d'inventaire lourd de 411 placettes de 0,3 ha, présentant un design défini en 3 zones, dont les modalités d'inventaires sont différentes en termes de diamètres mesurés. Plusieurs études ont porté sur ce site, comme l'étude du zonage des gros bois commercialisables et l'étude des gradients floristiques, mais personne n'a pris la peine de vérifier la valeur intégrative et prédictive de ce dispositif particulier, notamment envers l'AGB.

RT n°2 :

Plusieurs indices en télédétection sont pressentis comme pouvant être les témoins de comportements et d'états physiologiques des canopées, intéressant les écologues pour des suivis phénologiques des forêts tropicales. L'indice SIWSI indique l'état en eau du système foliaire, et ainsi indique des stress hydriques saisonniers et localisés. Alors que l'EVI représente le niveau de l'activité chlorophyllienne et photosynthétique. Ces indices fournis par MODIS sont généralement utilisés à une échelle régionale, mais nous avons prouvé leur intérêt à une échelle très locale, celle du massif de Counami. Nous avons par ailleurs démontrés que des cinétiques annuelles particulières sont représentatives des différents types de structures forestières et leurs niveaux de biomasse associés.

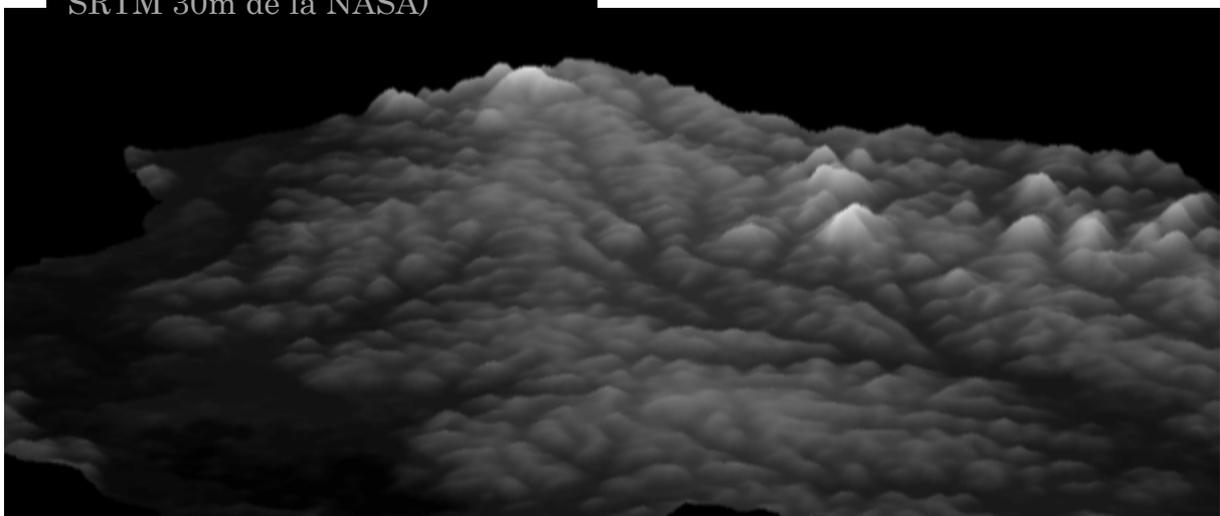
RT n °3 :

Plusieurs études ont déjà démontré, sur des sites ponctuels en Guyane ou dans d'autres pays, que la géomorphologie et la topographie, en lien avec les caractéristiques hydriques des sols, sont des paramètres structurant de la forêt tant à des échelles larges (les zones biogéographiques), qu'à des échelles plus restreintes (les unités de reliefs ou les stations). Renno & al (2008) ont développé un nouvel indice en lien avec la topographie et l'hydromorphie locale appelé HAND ('Height Above Nearest Drainage'). Ils ont testé l'indice HAND comme un descripteur de l'eau du sol, de la topographie et de jeux de données de végétations du centre de l'Amazonie, et il s'est révélé être fortement corrélé aux conditions hydriques du sol, comme les classes de profondeur de la nappe d'eau, et la topographie. Ainsi ce nouvel indice, utilisé comme variable environnementale dans l'étude principale, mérite de détailler sa méthodologie cartographique de production pour le massif de Counami.

RT n°4 :

Les bas fonds sont traditionnellement définis comme des zones où l'hydromorphie règne, entraînant une dynamique forestière atypique responsable d'une structure forestière particulière (faible taille des arbres et des diamètres amoindris par un renouvellement par chablis accru, donc une biomasse plus faible mais en partie compensée par la capacité de croissance du cortège floristique et la possible fertilisation des sols). Un indice de zone inondable a été développé par l'ONF dans le cadre du développement de la carte de Géomorphologie du département de la Guyane, cet indice a été utilisé comme variable environnementale dans l'étude, et la méthode de production de cette variable est détaillée dans cette note.

Le Massif de Counami (données SRTM 30m de la NASA)



LES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES ET LA REPARTITION SPATIALE DE L'AGB, UNE APPROCHE LOCALE POUR UNE VISION REGIONALE EN GUYANE

Sommaire

1. Introduction :	1
2. Matériel et méthodes :	4
a. Localisation du site principal d'étude :	4
b. Protocole d'inventaire :	4
c. Estimation de la biomasse :	5
d. Méthodologie globale :	6
3. Résultats :	13
a. Les variables de structure :	13
b. Composition floristique et structure :	15
c. Contraintes extrêmes et structures :	16
d. Hydromorphie et topographie :	17
e. Géologie fine :	19
f. Hand :	19
g. Variables Paysagères :	21
h. Variables MODIS :	23
i. AFM : Analyse Multi Factorielle de l'ensemble des variables environnementales :	24
j. LM et Modèle de prédiction :	26
4. Discussion :	29
a. Les limites des calculs de biomasse :	29
b. Structure et composition floristique :	30
c. Des stations forestières définissables par la topographie :	31
d. Des variables expliquant la répartition spatiale au sein de ces stations forestières :	32
e. Des variables attendues mais décevantes :	35
f. Vers une estimation des services écosystémiques de l'ensemble de la forêt Guyanaise – la carte des stocks de Carbone :	36
Bibliographies :	37
Annexes : résultats des modèles	40
RT n°1 : Couunami, des parcelles d'inventaire rapide au design taillé pour l'estimation de la biomasse forestière.	43
RT n°2 : ESI & SIWSI – phénologie des forêts tropicales de Guyane à une méso-échelle à partir des images MODIS	55
RT n°3 : HAND « Height Above Nearest Drainage »	65
RT n°4 : Indice des zones inondables de l'ONF - carte de géomorphologie de la Guyane.	75

Liste des figures :

<i>Figure 1. Structuration spatiale et échelles de décomposition de la géomorphologie, et des paysages forestiers de Guyane Française. Source : ONG (Guitet, à paraître).....</i>	<i>2</i>
<i>Figure 2. Localisation du massif de COUNAMI en Guyane, dispositif d'inventaire de la Forêt de COUNAMI, et schéma d'une placette - ONF (Pérot, 1999).....</i>	<i>4</i>
<i>Figure 3. Logique de calcul de l'indice HAND, les triangles représentant les positions des placettes.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 4. Résultats de l'ACP des variables de structure. Variables Factor Map. Les variables AGB et topographie sont utilisées comme variables illustratives.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 5. Cartographies des 411 plots de COUNAMI représentant les différentes variables de structure, et juxtaposée à droite la carte du MNT produite à partir du SRTM_30m de la Nasa.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 6. Résultats de l'AFM entre les variables de structure, les taxes et la topographie. Cercle de corrélation, carte des facteurs et carte des individus reclassifiés. L'AGB et la Topographie ont été utilisés comme variables illustratives.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 7. Variations des AGB moyens des plots de COUNAMI selon la présence ou l'absence des différentes contraintes.</i>	<i>16</i>
<i>Figure 8. Résultats de l'Analyse de Correspondance Multiple sur les variables d'hydromorphie et de topographie de COUNAMI et répartition des deux espèces indicatrices sur le gradient topographique.</i>	<i>18</i>
<i>Figure 9. Reclassification de l'indice topographique, et gradient d'AGB. Sur une correction du travail de Pélissier et Coueron (2003).</i>	<i>18</i>
<i>Figure 10. Résultats de l'ACP sur les variables de micro géologie. Carte des facteurs des variables. L'AGB et la Topographie sont des variables illustratives.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 11. Résultats de l'ACP sur les variables HAND. Carte des facteurs des variables. L'AGB et la Topo sont des variables illustratives.</i>	<i>20</i>
<i>Figure 12. Valeurs moyennes des AGB selon trois variables du groupe HAND. (Coin haut gauche) Effet de la hauteur sur la biomasse. (Coin bas gauche) Effet du potentiel gravitationnel sur la biomasse. (Droite) Effet des classes de pentes sur les valeurs d'AGB des différents niveaux topographiques. Les points entourés de cercles signalent des faiblesses en effectifs (< 8 individus).....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 13. a. Répartition des 5 classes croissantes d'AGB selon les 7 classes topographiques (1 – crête ; 2 = plateau ; 3 = haut de pente ; 4 = milieu de pente ; 5 = bas de pente ; 6 = bas-fond ; 7 = plaine) ; b. Dynamique annuelle du SIWSI pour les 5 classes d'AGB ; c. Dynamique annuelle de l'EVI pour les 5 classes d'AGB.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure 14. Poids des groupes sur les 5 premiers axes de l'analyse multifactorielle (AFM) et variance expliquée par chaque axe.</i>	<i>25</i>
<i>Figure 15. Cercle des corrélations de l'AFM pour les variables quantitatives.</i>	<i>25</i>
<i>Figure 16. Page précédente : Résumé des régressions linéaires opérées pour chaque groupe de variables. (Méthode Stepwise pour effacer les variables non significatives ($P > 0.1$) $**P < 0.01$, $*P < 0.5$). En vert foncé les variables fortes et en vert clair les moyennes ; Cette page : résumé des variables sélectionnées par les différents modèles.....</i>	<i>28</i>

LES VARIABLES ENVIRONNEMENTALES ET LA REPARTITION SPATIALE DE L'AGB, UNE APPROCHE LOCALE POUR UNE VISION REGIONALE EN GUYANE

1. Introduction :

La forêt Guyanaise est considérée par beaucoup comme un gros block homogène, comme un seul et même écosystème et habitat. L'effet de désordre cache en réalité une organisation et une hiérarchisation complexe des structures dont les contours sont difficiles à dessiner du fait des nombreux paramètres à prendre en compte, du manque de connaissance et de recul. Un très haut niveau de biodiversité, jusqu'à 160 espèces forestières par hectare (Ter Steege & al, 2000. 2003. 2006 ; Sabatier, 1990), la difficulté de prédire les hétérogénéités spatiales dans la répartition des espèces et les compositions floristiques, les difficultés de prédire les relations sols plantes (Tuomisto & al, 2003.a) et les effets des nombreux paramètres environnementaux sur la variabilité des structures forestières et la distribution des gros volumes... expliquent la difficulté à définir les habitats des forêts Néotropicales (Valencia et al, 2004).

Sur l'aspect stock de Carbone, il est très difficile d'en estimer les variations spatiales tant les conditions et les paramètres in situ peuvent le faire varier (Silk & al, 2009 ; Laurence & al, 1999 ; Clark & Clark, 2002, Chave & al, 2004). Ces paramètres peuvent généralement être caractérisés par deux types de variables : des variables directes ou de structure, intrinsèques aux peuplements ; et des variables environnementales dites exogènes (sol, climat, relief). L'importance relative de ces variables pour estimer un stock de Carbone d'une aire définie, varie selon l'échelle d'observation : continent < pays < région < massif < parcelle. Là, réside la difficulté majeure des écologistes à pouvoir faire d'estimations locales des extrapolations à plus grande échelle.

La géomorphologie s'intéresse à la forme du relief comme résultante des effets de l'érosion gouverné par le climat, présent et passé, sur le substrat géologique qui les supportent. Plusieurs études ont déjà démontré, sur des sites ponctuels en Guyane ou dans d'autres pays, que la géomorphologie et le climat sont des éléments structurants de la forêt tant à des échelles larges (les zones biogéographiques - Sabatier & al, 1997, 2007) qu'à des échelles plus restreintes (les unités de reliefs ou les stations - Paget, 1999). La géomorphologie apparaît donc comme un indicateur possible de la biodiversité (également biodiversité faunistique – Peres 1999) et de la structure forestière, et les forestiers s'y intéressent pour réaliser leur plan de gestion dans la partie Nord de la Guyane. Sur la base des études géomorphologiques de la Guyane, il apparaît que trois échelles emboîtées d'organisation (cf. figure 1) sont à la fois efficaces pour approcher les processus naturels et leurs impacts sur la

végétation, et pertinentes pour l'aménagement et la gestion durable des massifs forestiers (rapport final programme AME – 2006): unité de modelé (Mésos relief B et Micro relief A), unité de paysage (Mésos relief A et Macro relief B), régions naturelles à l'échelle de la Guyane (Macro relief A).

Echelle	Zonage géomorphologique	Zonage écologique
10^4 km ²	Macro relief A : Bouclier des Guyanes	Biome : Forêt tropicale humide sempervirente
10^3 à 10^2 km ²	Macro relief B : Unités paysagères	Domaine biogéographique : zonage basé à la fois sur une homogénéité bioclimatique et la répartition des espèces végétales (phytogéographie)
10^2 à 1 km ²	Mésos relief A : Massifs	Région naturelle : unité naturelle aux caractéristiques de sol et de climat suffisamment homogènes pour abriter des types de forêts comparables. La géologie joue un rôle fondamental dans la définition de ces unités.
10^{-1} à 10^{-2} km ²	Mésos relief B et Micro relief A : Unités de modelés et de reliefs, voir plus petit	Station : est une étendue de terrain de superficie variable (quelques m ² à plusieurs dizaines d'ha), homogène dans ses conditions physiques et biologiques : mésoclimat, topographie, composition floristique, sol, dynamique et structure de la végétation spontanée.

Figure 1. Structuration spatiale et échelles de décomposition de la géomorphologie, et des paysages forestiers de Guyane Française. Source : ONF (Guitet, à paraître)

Les habitats forestiers correspondent à des ensembles indissociables comprenant un compartiment stationnel, une végétation associée et une faune ayant tout ou partie de ses activités vitales sur l'espace considéré. L'habitat est souvent défini sur la base d'une analyse phytosociologique (approche CORINE Biotope), il est aussi possible de définir les habitats sur la base d'une description physionomique (faciès). C'est l'approche retenue par Hoff et de Granville pour la Guyane (2001). La végétation est donc l'élément de diagnostic fondamental d'un habitat forestier. Les liens entre géomorphologie et faciès forestiers s'établissent en définissant des unités de paysage au sens écologique du terme (paysage = entité régionale caractérisée par une géomorphologie dominante ou l'association et la répétition d'éléments géomorphologiques particuliers). Plusieurs programmes de longues dates (AME 94-99, AME 00-06, APR EcoTrop 05-08, Habitat 08-11) ont concrétisé le développement de ces outils et méthodologies de segmentation du territoire, pour aboutir cette année à la carte des habitats (et/ou paysage) de la Guyane (Guitet & al, à paraître).

La définition de ces habitats s'appuie sur deux approches. Une première approche à l'échelle du macro-relief B consiste à définir de façon précise les grands reliefs guyanais s'inspirant du zonage des grandes régions naturelles réalisé par Paget (1999) sur la base des travaux de Boyé (1979) et de Granville (1979). Une deuxième approche à l'échelle du méso-relief B consiste à individualiser les unités de modelés définies comme un motif élémentaire du relief généralement constitué par un interfluve et délimité par un réseau hydrographique plus ou moins dense, incisif et orienté. Ce travail a permis de définir 82 unités de reliefs considérées comme autant de régions naturelles. Ces unités de reliefs ont été regroupées en 12 types de paysages différents, appartenant à 6 grandes classes géomorphologiques.

Cette carte des habitats, s'appuyant sur une segmentation par des typologies géomorphologiques et celles-ci pouvant être caractéristiques de types de structures forestières, permet donc de définir des unités de gestion. C'est en tout cas l'hypothèse de travail de l'ONF. **Dans la même logique, notre travail part du postulat que cette carte est un point incontournable de segmentation du territoire si l'on veut estimer les stocks de Carbone forestier de la Guyane avec précision et cela à différentes échelles d'observation.** Ainsi : (1) un gradient Nord/Sud des grandes structures géomorphologiques (Paget, 1999) est, en parallèle d'un gradient pluviométrique Nord/Sud et au même titre que Pennec et Gond (2010) ont décrit un gradient Nord/Sud des typologies forestières par télédétection décrivant des patterns phénologiques spécifiques, liable à des différences de biomasse à cette échelle d'observation ; (2) à une échelle plus réduite, chacun des 12 paysages est représentatif de compositions floristiques, de modes de fonctionnement des forêts, de dynamiques de succession et de recrutement et de conditions bioclimatiques différents amenant à des biomasses différentes ; (3) descendant encore d'un niveau, chacun de ces 12 paysages peut être redécoupé en fonction des différentes unités de reliefs (ou massif) qui les composent, et des variantes climatiques, voir de sol, peuvent encore faire varier la biomasse globale entre deux massifs d'un même paysage ; (4) et enfin atteignant le niveau dichotomique le plus bas, celui sur lequel la présente étude se focalise, la variabilité au sein d'un massif (méso-échelle B) caractérisée par les comportements des différentes stations.

Ainsi cette étude s'attèle à définir un niveau de compréhension du bas de l'échelle, en tentant de comprendre la variabilité spatiale de l'AGB du massif forestier de Counami (12400 ha). Ce site a subi en 1999 un inventaire systématique à fort taux de sondage [ist] (Blatzinger, 2001) sur plus de 411 parcelles de 0.3ha. Les données dendrométriques, couplées à de nombreuses informations sur les conditions environnementales de chaque parcelle, en font un inventaire de choix dans la perspective citée précédemment. Notre étude s'attaque donc à la base du problème, nous positionnant sur un massif précis, d'un habitat particulier :

- quelles variables environnementales expliquent le mieux la biomasse forestière à l'échelle d'un massif ?

Notre étude apporte une pierre à l'édifice, dans l'objectif ultime est de réaliser une carte de la biomasse forestière de Guyane, précise et facilement implémentable. Avant de pouvoir remonter les échelles décrites précédemment il faut arriver à un certain niveau de compréhension en bas, voir si les modèles sont répétables ailleurs (en incluant alors la variabilité climatique et des sols) et enfin prouver une extrapolation sur les échelles les plus hautes. En vue de passer aux prochaines étapes nous sommes interrogés sur :

- quelles variables peuvent avec une précision suffisante prédire l'AGB à distance sans le besoin d'un inventaire terrain ?

2. Matériel et méthodes :

a. Localisation du site principal d'étude :

La forêt de Counami est une forêt de type ombrophile sempervirente de la bande côtière de Guyane. Située à 143 km de Cayenne, et environ 50 km au Sud d'Iracoubo, elle est délimitée géographiquement par la rivière Counamama (à l'Est) et le fleuve Iracoubo (à l'Ouest). Ce massif d'environ 12 400 ha, représenterait un volume sur pied d'environ 120 m³/ha de gros bois d'œuvre selon les sondages de 1975 (Roggy, 1997) et les inventaires de 1999 (Mapaga, 2004), ce qui témoigne de biomasse d'un niveau moyen à bas pour la Guyane.

b. Protocole d'inventaire :

L'inventaire des années 1999, devait couvrir les 12 240 ha du massif et ainsi produire 608 plots de 0.3ha. Cependant, avec la difficulté d'accès et les coûts élevés du dispositif, 22023 arbres, à partir de 7.5 cm de DBH ont été mesurés sur 411 plots de 0.3 ha, répartis de manière régulière sur une grille de 500 m × 400 m.

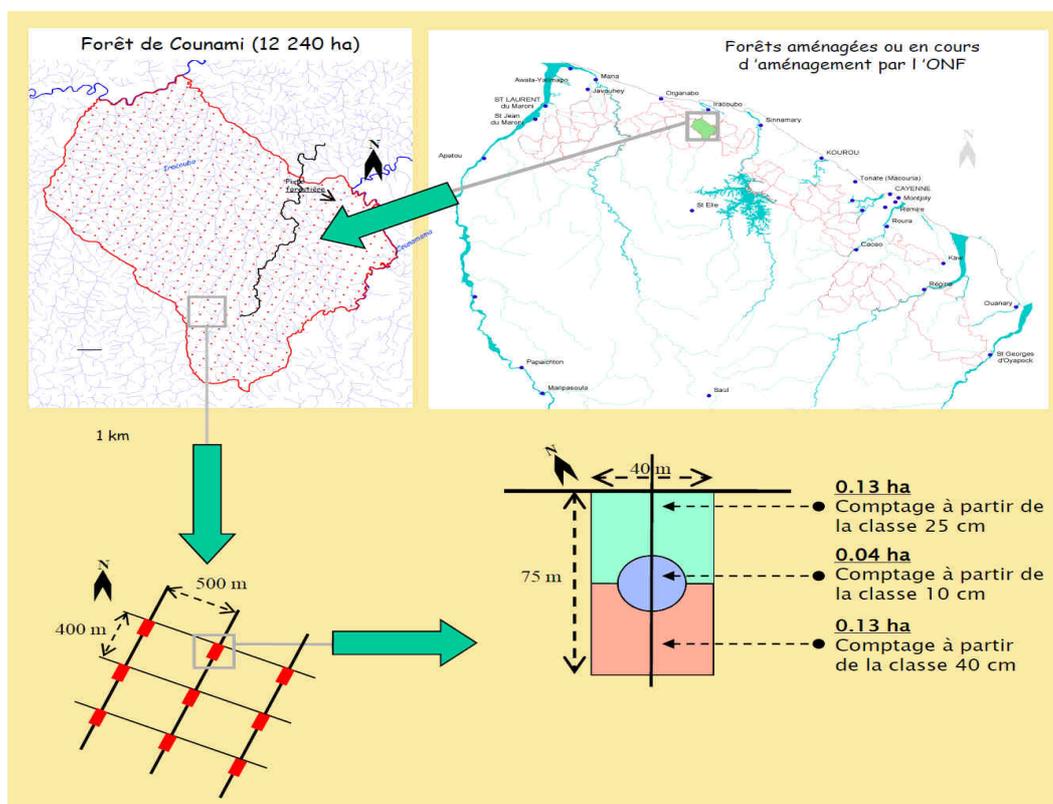


Figure 2. Localisation du massif de Counami en Guyane, dispositif d'inventaire de la Forêt de Counami, et schéma d'une placette - ONF (Pérot, 1999)

Les parcelles d'inventaires, de 40 × 75 mètres, sont localisées de part et d'autre du transect vertical. Chaque parcelle est subdivisée en 3 sous parties :

- au centre de la placette, un cercle de 11.28 mètres de diamètre (sous-plot 'a' de 0.04 ha) où les arbres de plus 7.5 cm de DBH ont été mesurés.

- au Nord de la placette, une sous-parcelle de 40 × 37.5 mètres (sous-plot 'b' de 0.13 ha) où les arbres au-dessus de 25 cm de DBH ont été mesurés.

- au Sud de la placette, une sous-parcelle de 40 × 37.5 mètres (sous-plot 'c' de 0.13 ha) où les arbres au-dessus de 40 cm de DBH ont été mesurés.

Cet inventaire systématique à fort taux de sondage [ist] (Blatzinger, 2001), est un cadre idéal pour tenter d'expliquer les structures forestières en fonction des conditions du terrain. Ainsi chaque parcelle a été caractérisée, lors de sa création dans les années 1999, par un certain nombre de descripteurs écologiques semi-quantitatifs relatifs à la topographie, la présence de cuirasse latéritique, la présence d'eau de surface et d'hydromorphie, la pente ...

c. Estimation de la biomasse :

Les inventaires détaillés (mesures individualisées pour chaque arbre) n'ayant pu être retrouvés, seul le jeu de données [CFI] (pour 'Counami Forest Inventories') du Package Diversity de R GUI a été utilisé (Pélissier & Couteron, 2003).

Ce jeu de données fourni les densités d'individus pour 14 classes de diamètres. Débutants à 7,5cm de DBH, le pas est de 5 cm pour les six premières classes, et 10 cm pour les 7 suivantes, avec une dernière classe de DBH supérieure à 107,5 cm. L'AGB est calculé pour chaque arbre de chaque parcelle, avec la valeur du milieu de la classe de DBH, selon le modèle de régression biomasse-diamètre de Chave (2004) spécifique aux forêts humides :

$$\langle AGB \rangle_{est} = \rho \times \exp(-1.499 + 2.148 \ln(D) + 0.207(\ln(D))^2 - 0.0281(\ln(D))^3)$$

D représente donc le DBH de l'arbre, et ρ représente la densité spécifique de chaque bois. La densité spécifique de chaque arbre ou W_{sg} (pour 'Wood Specific Gravity') a été établi à 0.75, valeur considérée comme la moyenne sur le site et les forêts du littoral Guyanais.

Habituellement la biomasse aérienne est calculée pour chaque arbre, les arbres d'une parcelle sont ensuite sommés et la valeur ramenée à l'hectare. Dans le cadre du protocole d'inventaire de Counami, il faut d'abord sommer chaque arbre pour chaque sous-placette, puis appliquer un coefficient multiplicatif de surface spécifique à chaque sous-placette, c'est alors que l'on peut sommer les 3 classes de diamètres et ramener en T/ha, unité conventionnellement admise : pour les AGB

sommés des arbres de 7.5 à 25 de DBH cm (sous-parcelle 'a') un facteur de multiplication de 0.3/0.04 est nécessaire pour estimer leur contribution globale à la parcelle de 0.3 ha ; pour les AGB sommés des arbres de 25 à 40 de DBH cm (sous-parcelle 'a' et 'b') facteur de multiplication de 0.3/0.17 ; pour les AGB sommés des arbres supérieurs à 40 cm de DBH étant inventoriés dans l'ensemble des sous-parcelles, il n'y a pas besoin d'un facteur de multiplication.

d. Méthodologie globale :

S'additionnant aux variables environnementales fournies par l'inventaire terrain, de nombreuses autres variables ont été développées. Chacune peut relever d'un lien théorique avec l'AGB, d'un niveau d'observation, d'une échelle de précision, d'une source (satellite/terrain) et/ou d'une méthode de production différents conduisant à regrouper certaines variables par typologies. C'est donc 9 groupes qui ont été identifiés (8 groupes de variables environnementales, 1 groupe de variables de structure), pour un total de 40 variables. Chaque groupe a été étudié séparément afin de tester les redondances entre les variables constitutives, mais également les liens de celles-ci avec l'AGB. Les méthodes d'analyse exploratoire par ordination (ACP, ACM, AFMD), comparaison de moyenne et 'r' de Pearson ont été largement utilisés.

Par la suite une Analyse Factorielle Multiple (AFM) a permis de tester le comportement de chaque groupe entre eux, observant ainsi des gradients selon les axes de l'AFM et les redondances entre les groupes. C'est une méthode d'ordination multi-variée qui explore les structures communes des variables et des groupes de variables (Escofier & al. 1994). Une AFM se déroule en deux étapes. D'abord une Analyse en Composante Principale (ACP) est calculée sur chaque groupe de variables, qui sont alors « normalisés » en divisant tous les éléments d'une variable par la racine carré de la première 'Eigen value' de l'ACP (ou de l'AMC si les variables sont qualitatives). Ensuite, les jeux de données normalisés sont fusionnés pour ne former qu'une unique matrice, et une ACP générale est alors réalisée. Les données individuelles sont alors projetées sur l'analyse globale. Ainsi, les variables de chaque groupe peuvent maintenir une covariance libre entre elles, et les relations entre les groupes de variables peuvent être examinées sans l'influence de la covariance interne au groupe. L'AFM a été réalisée à l'aide du Package FactoMineR sur R.

Par la suite, des régressions linéaires pour chacun des groupes de variables, ont été utilisées pour définir les variables qui influencent le plus la répartition de l'AGB ; une sélection de type 'Forward' sur un 'Stepwise' a été utilisée avec un seuil à $P < 0.05$. Dans l'optique de réponse à la deuxième problématique fixée, une colonne renseigne sur la reproductibilité à distance de chaque variable (inventaire terrain ou SIG).

Enfin, des modèles statistiques estimant l'AGB à partir des variables environnementales (donc sans les variables de structure), ont été sélectionnés par l'AICC ('Aikaike Information Criterion Corrected' – Akaike, 1974) et le BIC ('Akaike Bayesian Information Criterion', Schwarz et al. 1978). Le meilleur modèle statistique minimise la valeur de l'AICC ou du BIC. Ces critères ne regardent pas seulement si le modèle 'fit' bien, mais incluent une pénalité qui est fonction croissante du nombre de variables sélectionnées. Appliquant ainsi le principe de parcimonie, on évite la sélection d'un trop grand nombre de paramètres libres soit un 'overfitting'. Les modèles ont été générés à partir du Package et fonction 'Glmulti' de R GUI. Aucune interaction n'a été retenue, et seules des modèles linéaires multiples ont été étudiés. Le BIC a été choisi car plus pénalisant il peut permettre au Glmulti d'arriver plus rapidement à un résultat, même si la littérature tend à présenter l'AIC plus efficace et performant (Burnham & Anderson, 2002, 2004 ; Yang, 2005). L'AICC est pour des échantillons de taille arrêtee préférable à l'AIC, si n est petit ou k large (Burnham & Anderson, 2002). De manière générale il convient d'utiliser l'AICC, car si n est large il tend à converger vers l'AIC. Utiliser l'AIC, plutôt que l'AICC quand n n'est pas beaucoup de fois plus grand que k², augmente la probabilité d'une sélection de paramètres trop grand (Claeskens & Hjort, 2008) :

$$AICC = AIC - \frac{2p(p+1)}{n-p-1}$$

$$(AIC = -2 \ln(L) + 2p)$$

$$BIC = -2 \ln(L) + p * \ln(n)$$

Dans la formule, L est la valeur maximale de la vraisemblance du modèle testé, p le nombre total de paramètre testé, et n est le nombre d'estimation ou équivalent à la taille de l'échantillon.

Tout d'abord deux modèles généraux ont été produits avec l'ensemble des variables, puis avec les variables faciles à développer ou ne nécessitant pas d'inventaire terrain. Puis s'accordant à dire que la majorité des 40 variables présentent un lien spatialisé plus ou moins fort fiable à la topographie, un modèle par classe topographique, donc 7 modèles ont été produits à partir des variables simples à développer.

Toutes les analyses statistiques ont été conduites avec le logiciel R version 2.13.2 (R Foundation for Statistical Computing, 2009).

Groupe – STRUCTURE :

Les variables de structure qui ont pu être produites sont : la densité globale, les densités pour les 3 classes de diamètre (10-25 cm ; 25-40 cm ; >40 cm), le DBH moyen, la surface terrière. Ces variables quantitatives ont été mises en correspondance dans une Analyse en Composante Principale, avec les variables AGB et Topographie comme illustratives.

Groupe – TAXA :

Le jeu de données [CFI] fourni un inventaire floristique de COUNAMI reclassifié selon 59 taxons. Une régression linéaire a permis de démontrer que certains taxons sont associables à des niveaux de biomasse forte, faible ou indéterminé. Dès lors une AFM juxtaposant le groupe des variables de structure et le groupe de composition floristique a été réalisée, l'AGB et la Topographie étant considérées comme variables illustratives. Une reclassification des individus sur l'AFM a été réalisée, afin de décrire des patterns comportementaux régionalisés.

Groupe – CONTRAINTES :

Le fichier des données d'inventaire de terrain fournissait à travers la colonne 'commentaire' des indicateurs d'état des parcelles, que nous avons réutilisés comme variables environnementales. Ainsi une variable indicatrice des chablis, voir du stade de recouvrement forestier, codée sur 4 niveaux a été produite : '1' absence de chablis ; '2' forêt secondaire en cours de reconstitution ; '3' présence de chablis ; '4' présence de gros chablis ou chablis fréquents. Une autre variable a été produite, renseignant sur la présence de condition hydromorphique ou alluviale forte, par exemple le passage d'une crique au milieu de la parcelle ou une forêt inondée ('1' absence ; '2' présence). Issue également du terrain, les Djougoun Pete, microreliefs formés de cuvettes de formes variables, remplies d'eau en saison des pluies, et que l'on rencontre sur sols ferrallitiques formés sur matériau granito-gneissique, ont constitué une variable reflétant les effets de contraintes de terrain ('1' présence ; '2' absence). Une variable de contrainte extrême comme synthèse des trois variables a été créée ('1' présence ; '2' absence). L'effet des différents niveaux de ces 4 variables sur les valeurs des AGB a été observé.

Groupe – HYDROM & Groupe – TOPOhydro :

La présence de traces d'hydromorphie des sols a été relevée lors des inventaires terrain. La caractéristique d'une hydromorphie forte est un sol constamment détrempé, y compris en dehors de la saison des pluies. Généralement on considère également qu'il y a hydromorphie lorsque la lame d'eau ne descend pas en dessous de 60 cm, les indices sont alors une accumulation de matière organique, souvent traduite par des résidus de décomposition noircis, et potentiellement la présence de pneumatophores, pinotières, ou racines échasses.

Le groupe HYDROM reflète une notion d'hydromorphie avec une approche globale du réseau hydrologique de COUNAMI (voir annexe RT 3 et 4). Trois couches d'hydromorphie étaient en notre possession ('1' absence ; '2' présence) : la couche d'hydromorphie par les relevés de terrain ; la couche d'hydromorphie produite via SAGA ; la couche des zones inondables de l'ONF. Les effets de ces trois variables sur les moyennes de l'AGB ont tout d'abord été testés.

Le groupe TOPOhydro, comme son nom l'indique, est un mélange de variable topographique et de variables reflétant de l'hydromorphie locale. Ainsi lors des inventaires de l'époque sept indices de topographie avaient été relevés indiquant la position de la placette : crête codé '1' ; plateau codé '2', haut de versant codé '3', mi-versant codé '4', bas de versant codé '5', bas fond codé '6', plaine codé '7'. Par ailleurs, la présence ou absence de certaines espèces, indicatrices des niveaux de la nappe d'eau, a été relevée ('1' absence ; '2' présence ; '3' fréquence). Le genre *Rapatea*, genre inféodé aux milieux humides, a été choisi avec les espèces périenales *rapatea sp.* et *spathantus sp.* Ainsi la présence de la première se traduit par des sols où la lame d'eau est affleurante, et la seconde la nappe est souterraine mais ne descendant pas sous 50 cm de profondeur sur l'année. Ces deux indicateurs ont été dissociés du groupe hydromorphie car présentant des patterns de répartitions différents selon un gradient topographique, qui nous a permis de produire une variable de synthèse entre la topographie et ces deux espèces. Les effets des différents niveaux de ces variables sur l'AGB ont été observés.

Des redondances certaines entre les deux groupes, notamment entre le groupe HYDROM et les espèces indicatrices, nous ont poussé à performer une AMC sur l'ensemble des variables de ces deux groupes, mais à garder la distinction pour la suite des analyses.

Groupe – microGEOL :

La présence d'éléments grossiers en surface de la placette a été relevée lors des inventaires de 1999 ('1' absence ; '2' présence ; '3' fréquence). Les blocs (fragment rocheux faisant plus de 20cm), les cailloux (fragment rocheux dont la dimension est comprise entre 2cm et 20cm) et les graviers (fragment rocheux dont la dimension est comprise entre 2cm et 20mm) ont été distingués, de même que les roches de type ferrugineuses (appauvries en silice à dominante rouge) ou de type quartzes (à dominante blanche ou grise). La présence de plaquettes riches en lamelles de micas, témoignant de la présence de pegmatites a également été relevée.

L'effet de la présence ou non des éléments figurés sur la moyenne de l'AGB a été observée. Les variables ont été considérées comme semi quantitative pour réaliser une ACP, avec l'AGB et la topographie en variables illustratives.

Groupe – HAND :

Lors des inventaires de 1999, deux pentes ont été mesurées par parcelle. Ainsi à partir du centre de la placette, la mesure se fait suivant la ligne de plus grande pente locale. L'opérateur vise le bas, au voisinage de la limite de la placette, un point dont la hauteur au-dessus du sol doit être égale à la hauteur de son œil. Il fait ensuite une mesure analogue vers le haut. Pour les pentes moyennes supérieures à 30%, la longueur de la pente est estimée à l'œil : moins de 50 mètres (pente mineure) ou plus de 50 mètres (pente majeure). Lorsque la placette est installée au niveau d'une rupture de pente (modification brusque de la valeur de la pente), n'est mesurée que la pente affectant la majeure partie de la placette.

A partir de ces deux variables (pente haut et bas de parcelle), les variables de pente Moyenne et la pente Maximum ont été produites. Seule la pente maximum a été retenue car témoignant d'un plus grand lien explicatif avec l'AGB lors d'une AOV, et évitant ainsi les variables fortement redondantes voir ressemblantes pour la suite de l'étude.

Daleles Rennó & al (2008) ont développé un nouvel indice intitulé HAND pour « Heigth Above Nearest Drainage ». Cet indice correspondant au rapport de la différence de hauteur entre une parcelle d'inventaire forestière et la crique la plus proche (sous-jacente dans le bassin versant), avec la distance entre ces deux mêmes points (cf. figure. 4). Il s'est révélé être étroitement corrélé avec des caractéristiques de drainage et des caractéristiques de composition et de structure des forêts du Brésil. Un travail cartographique à partir du MNT du 'SRTM_30m' de la Nasa et du logiciel SAGA-GIS, a permis de développer cet indice mais également d'extraire des données pour trois variables (voir en annexe RT 3) : la hauteur de la parcelle ; le potentiel gravitationnel (la différence de hauteur avec la crique) ; le HAND.

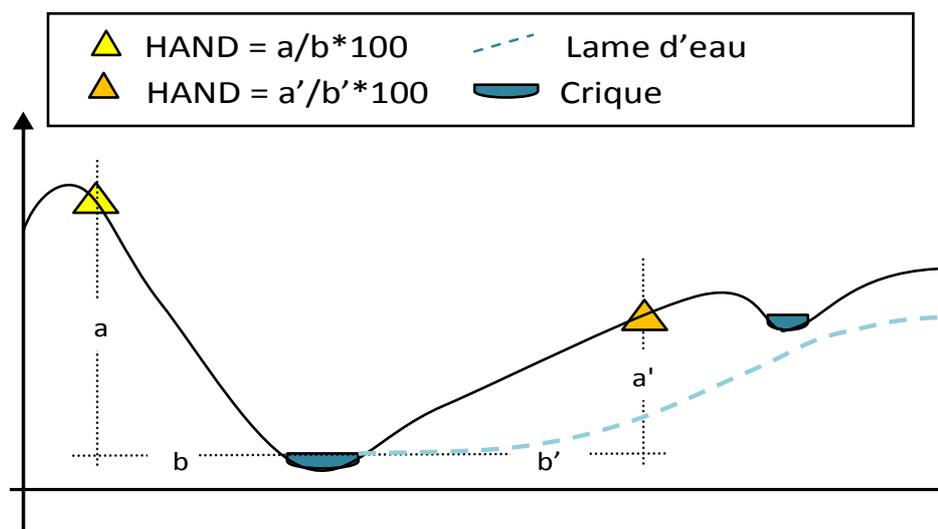


Figure 3. Logique de calcul de l'indice HAND, les triangles représentant les positions des placettes.

Une ACP a été réalisée sur l'ensemble des variables, avec l'AGB et la topographie en variables illustratives. Les effets des classes de pente sur l'AGB ont été observés sur les valeurs moyennes, mais également à l'intérieur de chaque classe topographique. De même, les effets sur l'AGB d'une reclassification des variables de hauteur et de potentiel gravitationnel ont été observés.

Groupe – Variables Paysagères :

Une première variable est représentée par les formations végétales distinguées en 1999 sur le terrain. Le site de COUNAMI faisant partie des forêts de basse altitude, il aura été distingué : des forêts marécageuses et « pinotières », localisées le long des criques et ruisseaux d'eau stagnante, où elles forment des bandes excédant rarement une centaine de mètres de largeur ; des forêts ripicoles, localisées le long des fleuves et des criques importantes ; des forêts de « flat » dans les vallées alluviales des grands fleuves, pas ou rarement inondées, mais dont la nappe phréatique se trouve à faible profondeur ; des forêts sur sol drainé.

La carte géomorphologique spécifique au massif de COUNAMI issue du travail de Sarah Hutter en 2001 a été numérisée, géoréférencée et vectorisée. La méthodologie de production de cette carte suit un découpage dichotomique sur 4 niveaux conduisant à la production de 9 classes :

- 1° bas fonds / reliefs
- 2° formes simples / formes complexes
- 3° altitude (formes simples >20 m et $20\text{m} < x < 40\text{m}$; formes complexes <60 et $>60\text{m}$)
- 4° le sommet (tabulaire ou convexe)

Un indice de physiographie, découlant du travail de Vincent Freycon dans son rapport de synthèse de 2001, a été produit. L'objectif de ce travail a été de rechercher l'existence de relations entre les données obtenues sur la ressource ligneuse du massif de COUNAMI et les informations à caractères géomorphologiques et topographiques. Les unités physiographiques du massif sont reprises de l'esquisse réalisée par V. Freycon (1999) à partir des cartes topographiques, des images satellites, optiques et radar, des photographies aériennes et de la carte de géologie. Les unités individualisées ont été regroupées en six grands ensembles : relief, plateau, collines basses, piedmont, interfluve et alluvions.

Pour la géologie deux sources distinctes étaient disponibles : la carte de l'Atlas développée par Choubert en 1960, a été numérisée, géoréférencée et vectorisée ; la nouvelle carte du BRGM de 2001. La différence entre ces deux couches, est que la première s'appuie plus sur la pétrochimie et la seconde sur l'âge des roches.

Une ACM a été réalisée sur ces 5 variables, afin d'en observer les possibles redondances, et l'effet des différentes conditions géomorphologique, géologique et d'habitat a été observé sur les moyennes d'AGB.

Groupe – EVI & Groupe – SIWSI :

Les images proviennent des images MODIS fournies par les bases de données de la NASA. Les années retenues sont de février 2000 à février 2005, période où l'on considère que le début d'exploitation forestière du massif de Counami est réduit et très localisée aux abords de la piste forestière. L'objectif visait à reconstruire une série temporelle de 5 ans afin de lisser ces indices sur chaque pixel de la zone. Le jeu de données provient donc du satellite Terra-MODIS du « National And Space Agency ». Le “Surface Reflectance 8-Day L3 Global 250 m” des produits MODIS (MOD09A1 & MOD09Q1) a été utilisé pour calculer le SIWSI. Cet indice a été utilisé pour sa représentativité du niveau d'hydratation du couvert végétal (Gond & al, 2009 ; Pennec al. 2011). Chaque scène intégrait les surfaces de réflectance pour les bandes 1 à 7 (rouge, infra-rouge, bleu, vert, et 3 bandes pour les bas infra-rouge). Les bande 2 [841–876 nm] (sur MOD09A1 à 500 mètres de résolution) et 6 [1628–1652 nm] (sur MOOD09Q1 à 250 mètres de résolution) ont été utilisés pour le calcul du SIWSI où NIR est le proche infrarouge et SWIR les faibles infrarouges :

$$\text{SIWSI} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}}$$

Le ‘Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250 m’ des produits MODIS (MOD13Q1) a été utilisé pour récolté l'indice EVI :

$$\text{EVI} = \frac{2.5(\text{NIR} - \text{R})}{\text{NIR} + 6\text{R} - 7.5\text{B} + 1}$$

L'indice EVI est utilisé pour sa représentativité de l'activité chlorophyllienne d'un couvert forestier (Pennec & al. 2011). Comme pour le « Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), qui sature pour les hauts niveaux d'activité chlorophyllienne, l'EVI est utilisé pour suivre le niveau d'activité métabolique du couvert forestier. L'EVI présente l'avantage sur le NDVI de pouvoir suivre les zones tropicales aux canopées denses, et de réduire les effets atmosphériques. Chaque produits des 8 et 16 jours s'appui sur le minimum de la bande de réflectance bleue, qui réduit les biais atmosphériques. Cet indice n'étant pas sensible aux nuages aucun masque n'est à produire.

Cependant, même quand des images composites sont utilisées pour réduire les effets atmosphériques il est clair que des pixels erronés existent toujours. Ainsi, un processus pour éliminer ces résidus d'erreurs ou les rendre moins visibles est nécessaire. Pour le MOD13Q1, une moyenne sur 5 ans des données bimensuelles (chaque 16 jour) est suffisante pour cacher partiellement les effets des derniers artefacts. Cependant, cette méthode n'est pas suffisante pour le MOD09A1 et

MOD09Q1. Une pré-étape consistant à réaliser un masque par valeur seuil spécifique à chacune des 7 bandes doit être réalisé. Schématiquement cette synthèse correspond à un 'patchwork' de 5 ans. C'est ensuite qu'un lissage temporel est réalisé pour créer le SWISI corrigé, et supprimer les résidus d'erreur des pixels (même travail que pour MOD13Q1).

Nous nous retrouvons ainsi avec une valeur mensuelle (moyenne sur 5 ans) et une valeur totale pour chaque indice et chaque plot. Une AOV sur l'AGB a été réalisée, afin de voir quels mois semblaient pouvoir le mieux expliquer la répartition spatiale de la biomasse. Il a ainsi été retenu :

- pour l'EVI : le mois d'Avril ; la moyenne annuelle a été conservée même si elle ne présentait pas d'effet
- pour le SIWSI : le mois d'Avril, Mai, Décembre et la moyenne annuelle.

La dynamique annuelle de ces deux indices sur une reclassification des 411 plots de COUNAMI selon leur niveau de biomasse (200 – 250 ; 250 – 300 ; 300 – 350 ; 350 – 400 ; 400 – 450 T/ha) avec en parallèle la position de ces reclassification sur les 7 classes topographiques a été observée.

3. Résultats :

a. Les variables de structure :

Un double gradient apparaît lorsque l'on regarde la densité globale d'arbre d'une part, exprimant un gradient Nord/Sud, et lorsque l'on observe les DBH répartis en classe de valeur faible (10 – 25 cm), moyenne (25 – 40 cm) et forte (>40 cm), c'est un gradient Est-Ouest (cf. figure 15).

Une Analyse en composante principale (ACP) a permis de mettre en correspondance les variables de structure, de densité et de topographie, l'AGB étant indiqué comme variable illustrative. L'ensemble des variables ont bien été représentées sur les deux premiers axes, avec 85% de la variance expliquée.

L'AGB principalement exprimé sur l'Axe 2, est faiblement corrélé avec le nombre d'individus ($r = 0,24$), cependant au-delà de 225 individus par hectare l'AGB a tendance à diminuer.

La densité est très fortement liée au nombre d'individus de la classe inférieur ($r = 0.97$). Ils sont tout deux corrélés négativement avec le DBH moyen et la densité des DBH supérieurs à 40 cm. Cette dernière est la variable de structure la plus fortement liée à l'AGB ($r = 0,77$). La surface terrière (ST) est également très bien corrélée à l'AGB, mais également corrélé au nombre d'arbres ($r = 0.62$).

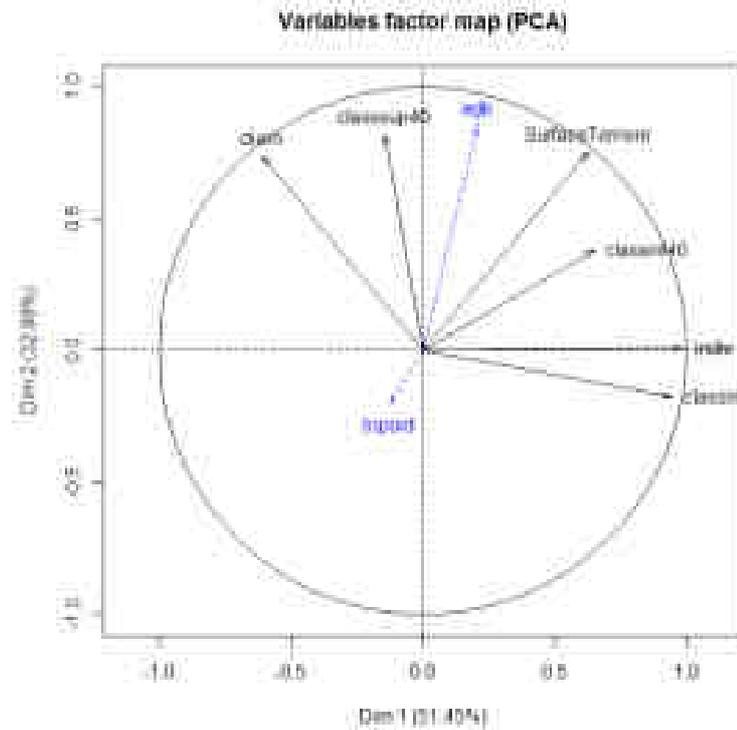


Figure 4. Résultats de l'ACP des variables de structure. Variables Factor Map. Les variables AGB et topographie sont utilisées comme variables illustratives.

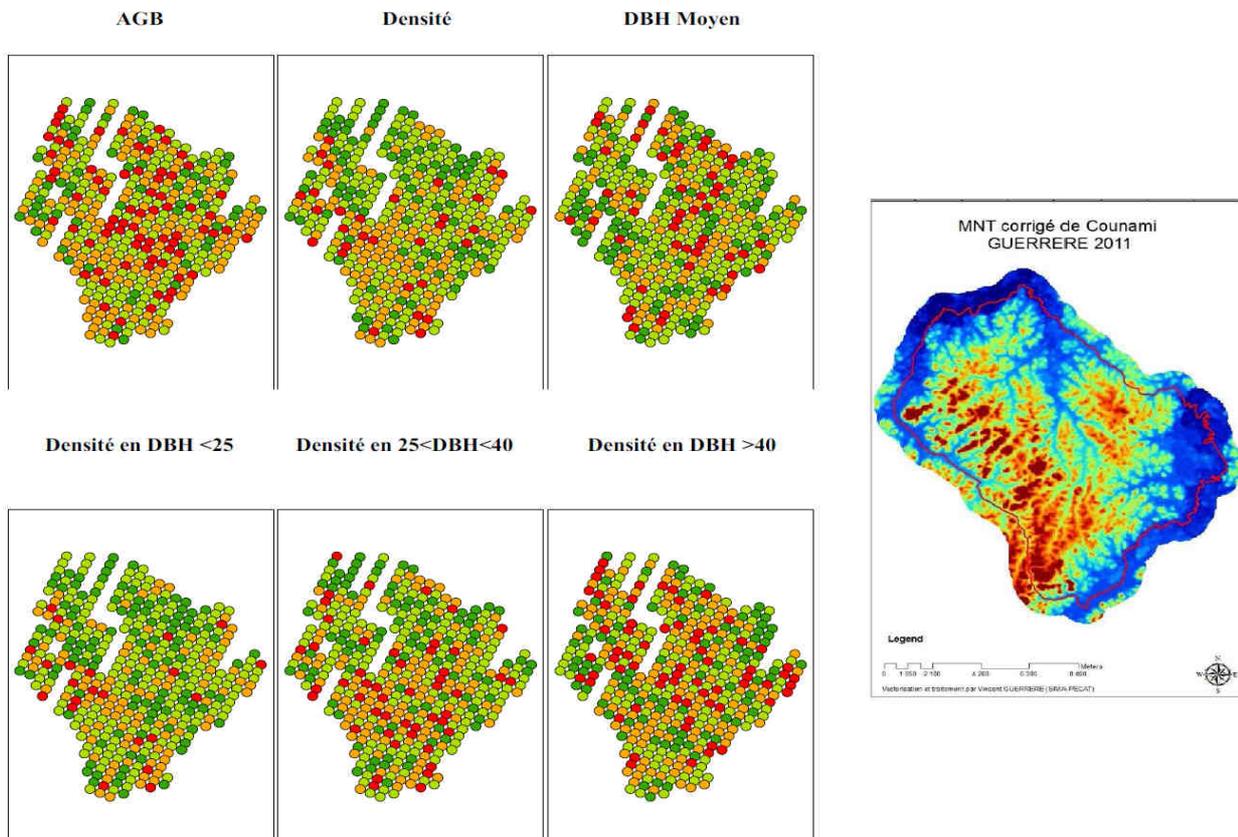


Figure 5. Cartographies des 411 plots de COUNAMI représentant les différentes variables de structure, et juxtaposée à droite la carte du MNT produite à partir du SRTM_30m de la Nasa.

b. Composition floristique et structure :

La reclassification des espèces inventoriées en 59 taxons par Couteron (2003), permet d'observer à travers une régression linéaire simple, que certains sont corrélés avec la biomasse. Ainsi 18 taxons sont corrélés (4 très fortement et 7 fortement) positivement ou négativement avec l'AGB. C'est-à-dire que certains taxons ont tendance à se retrouver principalement dans des forêts à forte biomasse, d'autres dans des forêts à faible biomasse, et d'autres sont indéterminés.

Une AFM a été effectuée sur ces variables taxonomiques, les variables de structure, la variable topographique et les valeurs d'AGB. C'est ainsi 4 groupes de variables qui ont été implémentés. Les variables de structure, de topographie, d'AGB et la majeure partie des variables espèces sont bien représentées, mais le grand nombre de variables ne permet d'atteindre une variance expliquée par les 3 premiers axes que de 14%. Une reclassification des individus a été opérée sur cette AFM. Ainsi trois patterns spatialisés ont été mis en exergue par cette analyse : groupe 1 : des espèces de structures indéterminées ; groupe 2 : des espèces représentatives de grosses structures ; groupe 3 : des espèces représentatives de petites structures. Le groupe 2 et de nombreuses espèces du groupe 1 semblent expliquer l'AGB en fonction d'un gradient topographique. Ces trois groupes intégrant les variables de composition floristique, permettent de décrire des patterns comportementaux fortement spatialisés à l'échelle du massif de COUNAMI, un gradient Est/Ouest est percevable.

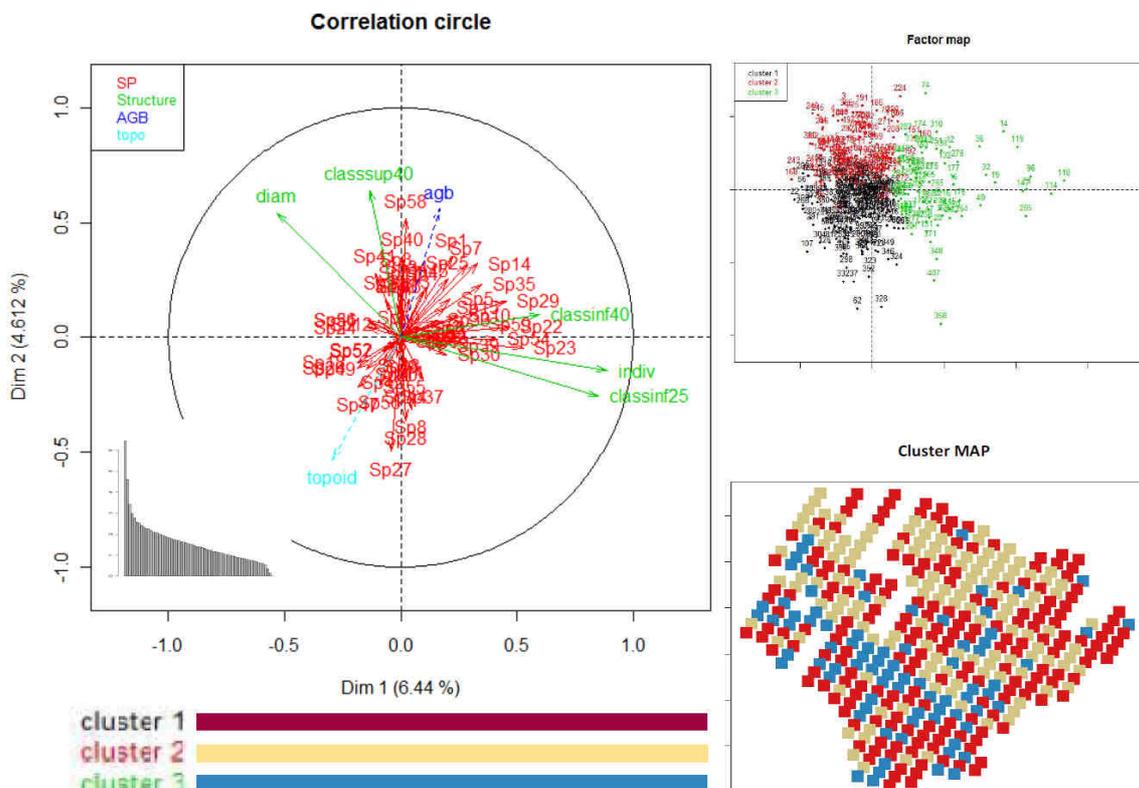


Figure 6. Résultats de l'AFM entre les variables de structure, les taxons et la topographie. Cercle de corrélation, carte des facteurs et carte des individus reclassifiés. L'AGB et la Topographie ont été utilisés comme variables illustratives.

Les plots représentatifs du groupe 1 sont décrits par le cluster 1 sur les graphiques ci-dessus (cf. figure.6). Leur positionnement est principalement en plaine et bas-fond (69% des plots). Les plots représentatifs du groupe 2 sont décrits par le cluster 2. Leur positionnement semble affectionner les reliefs plus anciens sur la partie Est, avec le plus fort effectif des trois groupes en position plateau. Les plots représentatifs du groupe 3 sont décrits par le cluster 3. Leur positionnement semble être fortement favorisé par les plus hauts reliefs de Counami à l'Ouest, en position dans les pentes et sur les crêtes. Les AGB varient fortement entre les trois groupes, avec des AGB faibles pour le groupe 1 (249 T/ha +/-47), des AGB élevés pour le groupe 2 (329 T/ha +/-54) et des AGB légèrement supérieurs à la moyenne pour le groupe 3 (296 T/ha +/-48).

c. Contraintes extrêmes et structures :

Les trois variables Djougoun Pete, Hydromorphie extrême et Chablis ont toutes trois un grand effet sur l'AGB (cf. figure.7), expliquant par là même une partie des valeurs excessivement faibles de certains plots du massif. Une variable fusionnant ces trois indices ('variable de contrainte forte'), permet d'augmenter la taille de l'échantillon tout en gardant cet effet. L'absence de contrainte semble mener dans les 4 situations à des AGB proches de la moyenne du massif à 283 T/ha (voir cases jaunes). La situation la plus extrême est lors des chablis de classe 3 imposant des AGB excessivement faibles (172 T/ha +/- 58).

	Eff	AGBmoy
Abs Djoug (codé 0)	403	283,7 +/- 61
Djoug (codé 1)	8	264 +/- 50
Abs d'hydromorphie extrême (codé 0)	390	285,5 +/-61
Crique, marécage, pinotière (codé 1)	21	244,4 +/-46
Abs chablis (codé 0)	392	283,7 +/-59
Forêt secondaire (codé 1)	4	243,4 +/- 63
Chablis (codé 2)	8	229,8 +/- 49
Chablis très présents (codé 3)	7	172 +/- 58
Abs Contrainte forte (codé 0)	365	289,1 +/- 59
Contrainte forte (codé 1)	46	237,5 +/-55

Figure 7. Variations des AGB moyens des plots de Counami selon la présence ou l'absence des différentes contraintes.

En présence d'une contrainte les structures se délocalisent vers les petits diamètres, à l'exception de la variable d'hydromorphie extrême, mais particulièrement pour les Djougoun Pete où les individus de gros gabari sont rares. Le nombre d'individus sur la parcelle diminue fortement, notamment pour les chablis de classe 3 où le nombre d'individus avoisine les 131 contre la moyenne de Counami de 191.

d. Hydromorphie et topographie :

Les trois variables représentatives de l'hydromorphie in situ (variable de terrain, variable développée via SAGA, et la variable des zones inondables de l'ONF) ont été étudiées en fonction de la variable topographique et de deux variables de présence d'espèces indicatrices des zones humides (*Rapatea* et *Spathantus*). Une AMC a permis d'évaluer la redondance entre les variables hydromorphiques et topographiques, en tant que variables qualitatives.

La couche des zones inondables et celle développée sur SAGA n'apportent aucune information à l'analyse d'un gradient topographique, à contrario de la variable d'hydromorphie de terrain (cf. figure.8). La couche d'information d'hydromorphie développée sur SAGA, à la différence de la couche des zones inondables de l'ONF, présente des AGB significativement différents (p-value = 0,00541). Ainsi au-delà d'une valeur du raster fixée expérimentalement à 10 000, les AGB ne dépassent jamais 310 T/ha et la moyenne est de 265 T/ha +/-49. Avant ce seuil la moyenne est de 287 T/ha +/- 63, l'AGB moyen de Counami étant de 283 T/ha +/- 61. Pour la variable d'hydromorphie de terrain les moyennes se creusent beaucoup plus, avec une moyenne d'AGB à 259 T/ha +/-51 en conditions d'hydromorphie, contre 289 T/ha +/- 61 en conditions non hydromorphes (p-value = 0,0000671).

Sur l'AMC, toutes les variables, mises à part les couches d'hydromorphie de l'ONF et de SAGA, sont bien représentées par tous les axes, avec 29% de la variance expliquée par les deux premiers axes. *Rapatea* et *Spathantus* semblent liées ($r = 0.48$), avec *Rapatea* étant une bonne indicatrice des zones humides de bas-fonds, et est bien liée aux relevés d'hydromorphie du terrain ($r = 0.54$). Cependant une différence de répartition, en lien avec le moindre niveau d'exigence de *spathantus*, permet à cette dernière de se retrouver sur les reliefs supérieurs témoignant d'hydromorphies sous-terraines faibles. Ainsi une recodification a été établie entre la topographie et la présence ou non de *rapatea* sur les faibles topographies, et *spathantus* sur les topographies supérieures, comme des indicateurs spatialisés sur un gradient topographique de la présence ou non d'hydromorphie (cf figure.9).

A l'observation des moyennes d'AGB, un gradient topographique apparaît témoignant ainsi d'une répartition spatiale de l'AGB prédéfinie par la toposéquence. Ainsi les AGB les plus faibles se retrouvent sur les plaines et les bas-fonds, alors que les plateaux et surtout les crêtes arborent les valeurs les plus importantes. Le long de l'indice topographique recodifié l'AGB suit le même gradient, avec à chaque situation topographique une modulation de la valeur en fonction des conditions d'hydromorphie selon deux scénarii :

- une modulation à la hausse de la biomasse pour les plateaux et les crêtes
- une modulation à la baisse pour les autres classes

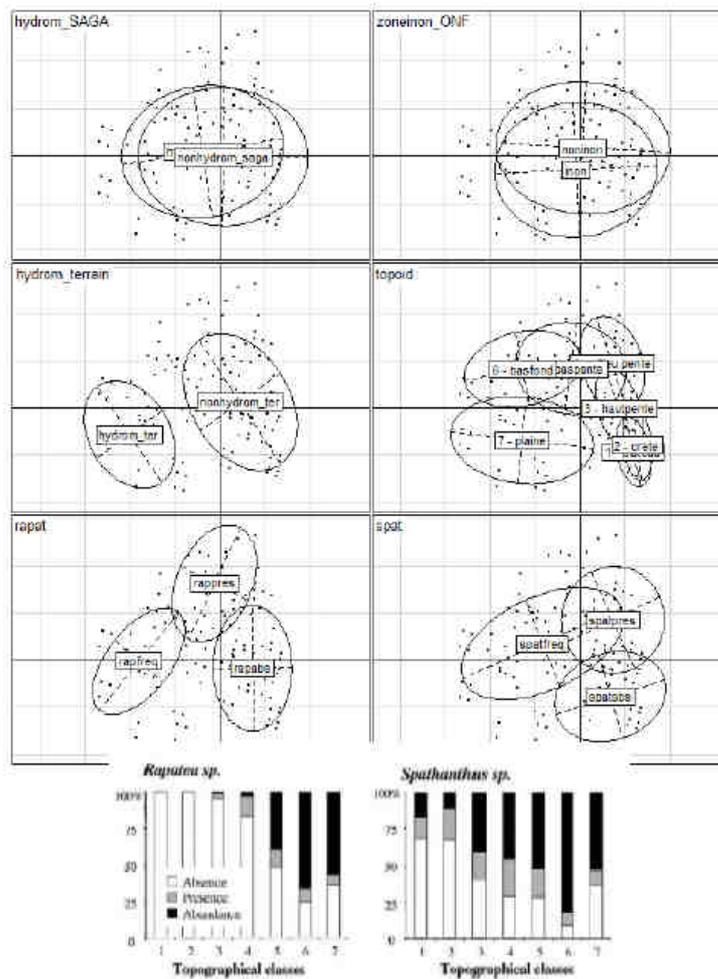


Figure 8. Résultats de l'Analyse de Correspondance Multiple sur les variables d'hydromorphie et de topographie de Couami et répartition des deux espèces indicatrices sur le gradient topographique.

Code Initial	N	moy. AGB	Ecart-Type	Spathanthus	Rapatea	Code Final	N	moy. AGB	Ecart-Type
1 - Crête	28	315,4	62,5	1	/	2 - Crête sans hydromorphie	19	310,1	48,5
				2 & 3	/	1 - Sommet légèrement hydromorphe	24	321,2	67,3
2 - Plateau	48	304,4	63,4	1	/	4 - Plateau sans hydromorphie	33	298,2	69,2
				1 & 2	/	3 - Haut de pente sans hydromorphie	25	304,4	65,6
3 - Haut de pente	61	294,7	59,3	2 & 3	/	7 - Haut de pente légèrement hydromorphe	36	287,9	54,4
				1 & 2	/	6 - Milieu de pente peu ou pas hydromorphe	40	291,2	52,7
4 - Milieu de pente	73	280,0	55,1	3	/	10 - Milieu de pente hydromorphe	33	266,4	55,7
				1 & 2	/	5 - Bas de pente peu ou pas hydromorphe	27	296,2	64,3
5 - Bas de pente	57	280,2	63,8	3	/	11 - Bas de pente hydromorphe	30	265,8	60,9
				/	2 & 3	8 - Bas-fond Hydromorphe	24	283,8	59,9
6 - Bas-fond	32	278,0	55,8	/	1	9 - Thalweg sans hydromorphie	49	270,9	54,8
				/	2 & 3	12 - Large Thalweg hydromorphe	71	261,2	59,6

Figure 9. Reclassement de l'indice topographique, et gradient d'AGB. Sur une correction du travail de Pélissier et Coueron (2003).

e. Géologie fine :

Une ACP a été réalisée sur les variables de géologie fine (cf. figure.10). Les variables sont, dans l'ensemble, très bien représentées sur les deux premiers axes, expliquant 65% de la variance. Les deux types de roches, Ferralitique et Quartzique, sont légèrement corrélées sur l'axe 1, mais fortement opposées sur l'axe 2. Les deux groupes de variables sont orthogonaux.

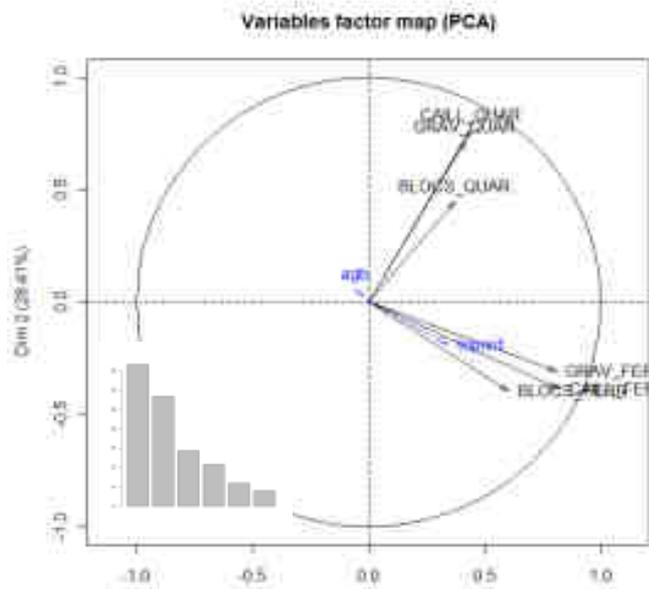


Figure 10. Résultats de l'ACP sur les variables de micro géologie. Carte des facteurs des variables. L'AGB et la Topographie sont des variables illustratives.

La présence de Quartzite témoigne d'AGB plus faibles notamment dans les éléments figurés les plus gros (présence bloc 277 T/ha +/-58, absence 284 T/ha +/-61 ; présence caillou 271 +/-52, absence 285 +/-62). A contrario la présence de traces ferralitiques semble augmenter l'AGB, notamment pour les éléments figurés les plus petits (présence caillou 289 T/ha +/-56, absence 280 T/ha +/- 64 ; présence gravier 292 T/ha +/-55, absence 276 T/ha +/-65). Néanmoins la topographie explique un positionnement logique des roches de type ferralitique sur les pentes et reliefs, et plus on descend dans la taille des éléments plus on se retrouve sur les plateaux et crêtes, à contrario les éléments quartziques semblent se retrouver sur les bas reliefs, les bas-fonds et les plaines. Les traces de mica apportent le même lot de conclusions que les roches Quartziques. La présence de traces ferralitiques, en bien plus grand nombre, réintègre parfaitement le positionnement des roches quartziques et du mica, mais sa prépondérance se situe sur le cœur du massif là où les deux autres sont quasi absentes. Les roches ferralitiques ont donc tendance à être retrouvées sur les formations complexes du massif de Counami (Hutter, 2001) avec l'épicentre sur les plateaux du centre pouvant ainsi expliquer des AGB plus élevés.

f. Hand :

Une ACP a été réalisée sur les variables de type Hand. L'ensemble des variables ont bien été représentées sur l'ACP, avec les deux premiers axes exprimant 61% de la variance (cf. figure.11). Les variables représentatives de l'altitude de la parcelle, du potentiel gravitationnel, des pentes et du hand, sont corrélées très fortement sur le premier Axe.

L'ensemble de ces variables semblent pouvoir trouver une part d'explication avec la topographie. Sur l'Axe 2 s'exprime principalement la variable relative aux classes de pentes, témoignant d'une corrélation avec l'AGB, qui lui est entièrement orthogonal aux autres variables s'exprimant sur l'Axe1.

L'indice Hand n'a montré aucun pouvoir explicatif des variables de structure, comme le diamètre moyen, la surface terrière, le nombre d'individus total et les classes de diamètre ($r \ll 0.20$), il en est de même avec la biomasse aérienne.

L'ACP a démontrée qu'il y avait effectivement un lien entre les classes de pentes et la topographie, et précédemment un gradient topographique agissant sur l'AGB a été démontré. Ainsi chaque classe de pente joue sur l'AGB, témoignant d'un gradient en cloche comme le montre la courbe noire sur le graphique ci-après (cf. figure. 12).

Ainsi de manière générale l'AGB a tendance à augmenter avec les pentes moyennes et rebaisser avec les pentes fortes, la variance diminuant de moitié vers les pentes fortes. Cependant, comme avec l'effet de l'hydromorphie, des patterns différents selon la position topographique sont percevables :

- l'AGB augmente en plaine avec une faible augmentation de la pente (10 %), l'interprétation des pentes moyennes et forte est impossible car relevant de situations inexistantes
- l'AGB diminue avec les faibles pentes dans les bas-fonds, l'interprétation des effets des pentes moyennes est difficile en vue des effectifs réduits
- l'AGB tend à suivre la courbe en cloche moyenne dans les pentes (bas, milieu et haut de pente réuni). Néanmoins l'AGB dans les milieux de pente ne suit pas tout à fait ce pattern, car la valeur d'AGB reste constante dans les fortes pentes (20,30 et 40%).
- l'AGB dans les crêtes baisse avec les pentes
- l'AGB augmente sur les plateaux avec les faibles pentes, l'interprétation dans les pentes moyennes et fortes est impossible en vue de l'absence de la situation.

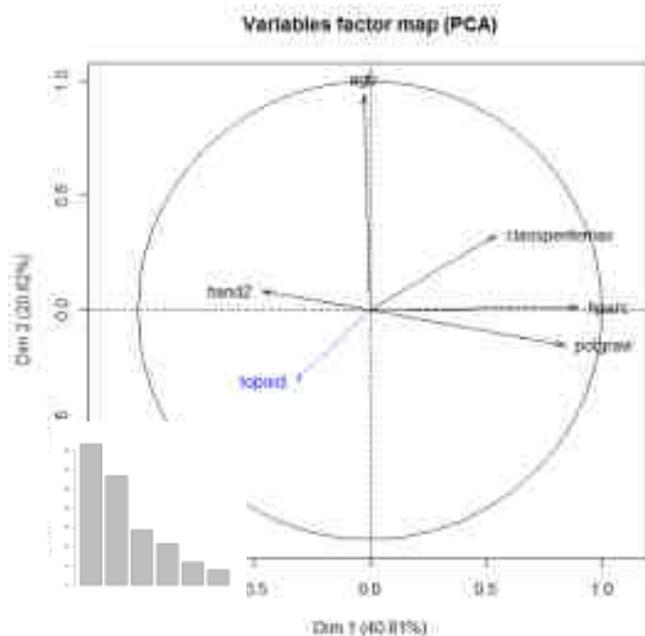


Figure 11. Résultats de l'ACP sur les variables HAND. Carte des facteurs des variables. L'AGB et la Topo sont des variables illustratives.

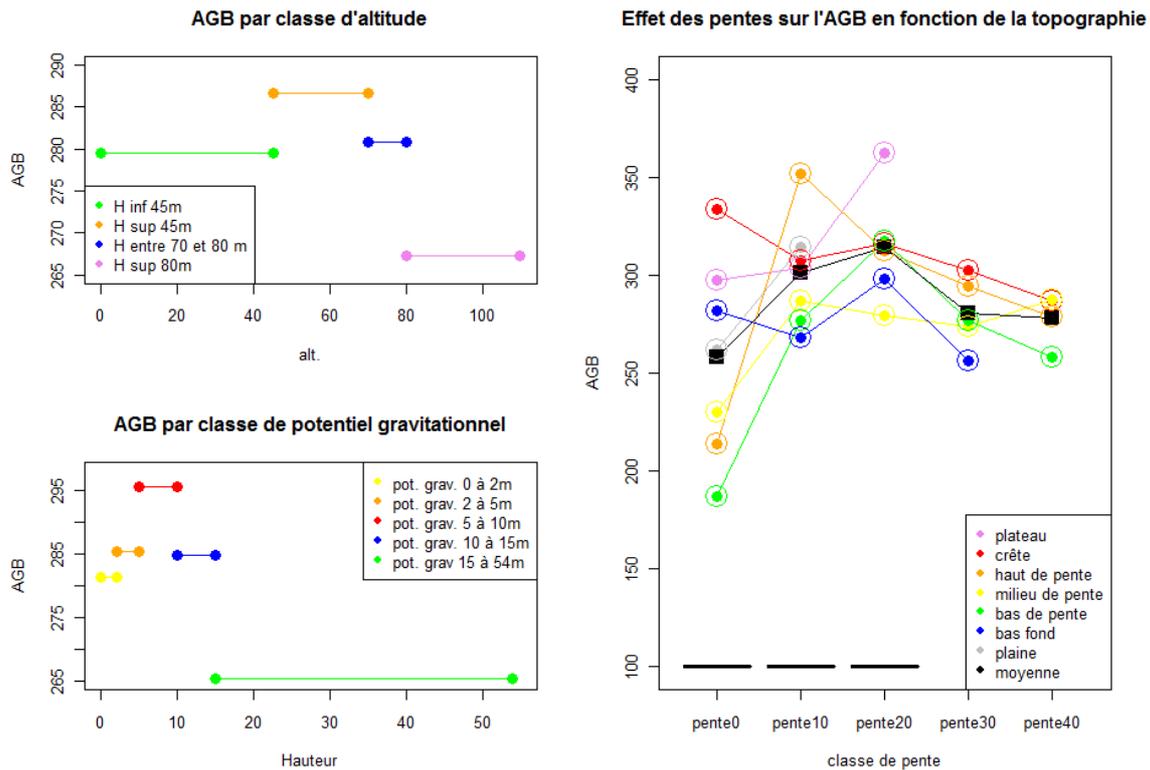


Figure 12. Valeurs moyennes des AGB selon trois variables du groupe HAND. (Coin haut gauche) Effet de la hauteur sur la biomasse. (Coin bas gauche) Effet du potentiel gravitationnel sur la biomasse. (Droite) Effet des classes de pentes sur les valeurs d'AGB des différents niveaux topographiques. Les points entourés de cercles signalent des faiblesses en effectifs (< 8 individus)

Le potentiel gravitationnel semble décrire un gradient en cloche similaire aux classes de pentes, avec des valeurs très faibles lorsque le différentiel de hauteur avec la crête est élevé.

Les classes de hauteur décrivent le même pattern, avec un saut des valeurs moyennes entre 40 et 50 mètres. Néanmoins, dans la classe de 45 à 70 mètres beaucoup de plateaux et crêtes du centre du massif se retrouvent. Au dessus de 70 mètres les plateaux et les crêtes ont des valeurs beaucoup plus faibles (jusqu'à 60 T de variation) que la moyenne globale de cette classe.

g. Variables Paysagères :

La variable créée à partir de la carte de géologie de 1960 par Choubert, présente les mêmes AGB pour les sols de types Bonidoro, Coswine et Démérara (277 T/ha), des AGB légèrement plus faibles pour l'Orapu (271 T/ha) et des AGB significativement plus élevés (290 T/ha) pour les migmatites Caraïbes. Si l'on intègre les classes de pentes, on obtient le même effet en cloche qu'expliqué précédemment, la topographie garde également son gradient avec les AGB les plus élevés vers les crêtes et les plateaux, à l'exception du Coswine et de l'Orapu qui malgré de faibles effectifs semblent avoir des biomasses légèrement supérieures sur les pentes.

La variable créée à partir de la carte de géologie du BRGM après les années 2000 présente de très faibles AGB (255 T/ha) sur les formations alluvionnaires, qui semblent suivre les fonds des vallées des cours d'eau principaux du massif de COUNAMI. Les Grauwacques et les Granitoïdes ont des AGB plus élevés (290 T/ha) avec pour les Granitoïdes un écart type très faible (+/- 26 T/ha). Le Démerara et les Monzogranites ont des AGB identiques et légèrement inférieurs à la moyenne (275 T/ha) mais avec des écarts types élevés (+/- 65 T/ha). Ce dernier présente des valeurs très faibles et stables pour les AGB sur plateau (266 T/ha +/-51). Les filons présentent le même AGB que la moyenne globale calculée sur les 411 plots de COUNAMI. De manière générale le gradient topographique est conservé sauf pour les Monzogranites. Le gradient décrit par les classes de pentes est observable uniquement sur les Grauwacques et les Monzogranites parce qu'ils représentent respectivement 60 et 15 % des plots du massif.

Les 5 niveaux de la variable physiographique ressemblent nominativement à la topographie. Et spatialement à la physiographie, mais avec un niveau de découpage beaucoup plus élevé (9 niveaux). Les redondances entre ces variables sont nombreuses et fortes.

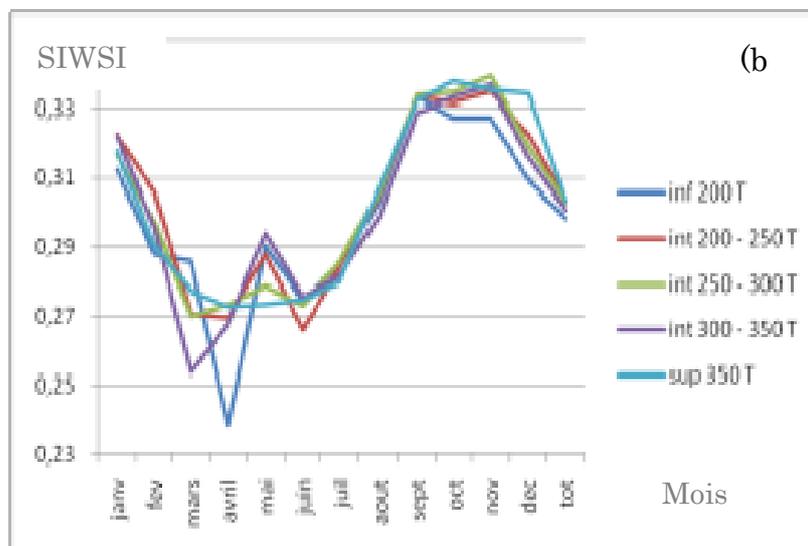
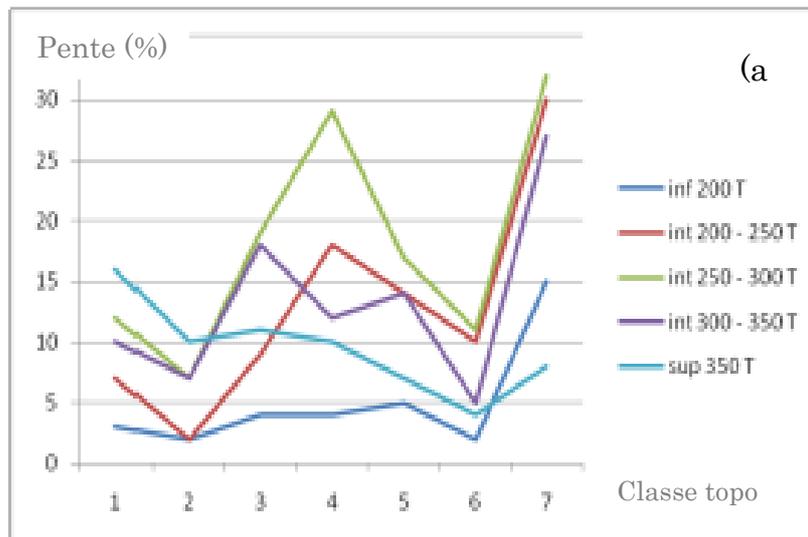
Au regard de valeurs de l'AGB identiques, la géomorphologie semble pouvoir abandonner le dernier niveau de découpage dichotomique établi par Hutter (2001), aboutissant finalement à 4 niveaux de la variable au lieu de 9 : bas-fonds (279 T/ha), formes complexes avec de petits interfluves (289 T/ha), formes complexes avec de grands interfluves (273 T/ha), formes simples (287 T/ha).

Il est intéressant de souligner deux effets des classes de pentes sur ces deux variables : les formes complexes avec de petits interfluves semblent avoir des AGB élevés dans les fortes pentes et une constance des AGB des piedmonts selon le niveau de pente rappelant le comportement du milieu de pente de la classe topographique.

La variable représentative des formations forestières présente des AGB moyens différents selon la formation observée. Ainsi les AGB les plus élevés se retrouvent sur les forêts de flat et les forêts sur sols drainés (290 T/ha +/-59), les AGB faibles sur les forêts marécageuses (248 T/ha +/-48) et les valeurs encore plus faibles mais très variables sur les forêts ripicoles (230 T/ha +/-90). Cependant un gros déséquilibre dans les effectifs de chaque niveau est perceptible avec 80% des plots étant constitutif des forêts sur sols drainés. Les classes de pentes et la topographie expriment les mêmes gradients d'AGB dans cette dernière formation.

h. Variables MODIS :

En vue du grand nombre de variables disponibles pour l'EVI et le SIWSI (respectivement 2 et 4 par mois sur 5 années) et afin d'obtenir un jeu de données suffisamment complet sur les 411 plots de Counami, une régression linéaire a été opérée sur les moyennes mensuelles. Ainsi le mois d'Avril et la moyenne annuelle pour l'EVI, et le mois d'Avril, Mai, Décembre et le total pour le SIWSI sont les 6 variables retenues pour présenter un lien avec l'AGB. Le découpage des AGB de Counami en 5 classes de valeur croissante, présente une certaine organisation topographique, complétée par les pentes (cf. figure.13.a). Les faibles AGB (bleu foncé) se retrouvent principalement dans les plaines, les AGB moyens (rouge violet et vert) se retrouvent préférentiellement sur les pentes, ou dans les plaines si la pente n'est pas nulle voir dans les hauts reliefs, et les forts AGB (bleu clair) se retrouvent sur les hauts reliefs.



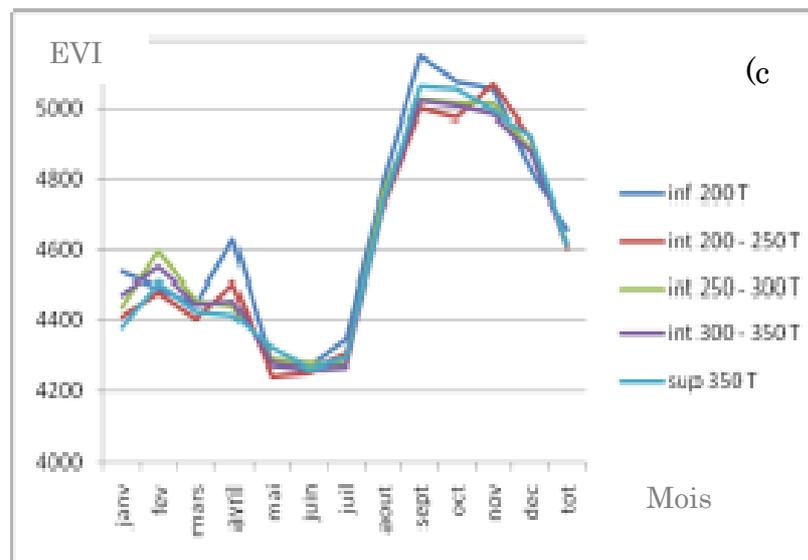


Figure 13. a. Répartition des 5 classes croissantes d'AGB selon les 7 classes topographiques (1 – crête ; 2 = plateau ; 3 = haut de pente ; 4 = milieu de pente ; 5 = bas de pente ; 6 = bas-fond ; 7 = plaine) ; b. Dynamique annuelle du SIWSI pour les 5 classes d'AGB ; c. Dynamique annuelle de l'EVI pour les 5 classes d'AGB.

Pour les deux sets de variables issues de la télédétection les forts AGB présentent les courbes les mieux lissées et pour chaque mois les écarts types les plus faibles. Ces AGB sont facilement décryptables face aux autres classes d'AGB sur le SIWSI du mois de décembre.

Les faibles AGB semblent ne pas disposer de la même stabilité. Cependant ils sont facilement repérables en trois points différents : le mois d'avril avec un pic négatif sur le SIWSI, et un pic positif sur l'EVI, et le mois de septembre avec un pic positif de l'EVI. Les trois niveaux de pente démontrent un pic négatif sur le SIWSI du mois d'Avril (cf. figure.13.b & .c).

i. AFM : Analyse Multi Factorielle de l'ensemble des variables environnementales :

Une AFM a été performée sur l'ensemble des variables afin d'étudier le comportement des différents groupes de variables entre eux (cf. figure.14 & 15). Nous avons une série de 38 variables décomposables en 9 groupes de variables : 8 groupes quantitatifs avec Structure (5 variables), Contrainte (4 variables), microGEOL (7 variables), HAND (4 variables), HYDROM (3 variables), TOPOhydro (4 variables), EVI (2 variables) et SIWSI (4 variables) ; 1 groupes qualitatifs les PAYSAGE (5 variables) ; et 1 variable illustrative et quantitative constituée par l'AGB.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
STRUCTURE	0,33	0,27	0,63	0,30	0,35
CONTRAINTE	0,31	0,27	0,36	0,58	0,39
HYDROMORPHIE	0,76	0,81	0,39	0,38	0,13
TOPOhydro	0,70	0,53	0,32	0,09	0,27
microGEOL	0,71	0,21	0,37	0,59	0,16
HAND	0,78	0,64	0,21	0,08	0,09
EVI	0,46	0,32	0,49	0,15	0,05
SIWSI	0,04	0,06	0,37	0,41	0,82
PAYSAGE	0,81	0,68	0,32	0,30	0,25
Axes	14,48%	8,33%	7,02%	5,84%	5,63%

Figure 14. Poids des groupes sur les 5 premiers axes de l'analyse multifactorielle (AFM) et variance expliquée par chacun des cinq premiers axes.

Toutes les variables et les groupes sont bien représentés sur les 3 premiers axes, petite exception pour le SIWSI s'exprimant que modérément sur les Axes 3 & 4, et fortement sur l'Axe 5. Un certain aplatissement du cortège de variables sur l'axe 1 est visualisable (cf. figure.15), et 30 % de la variance est expliquée par les trois premiers axes.

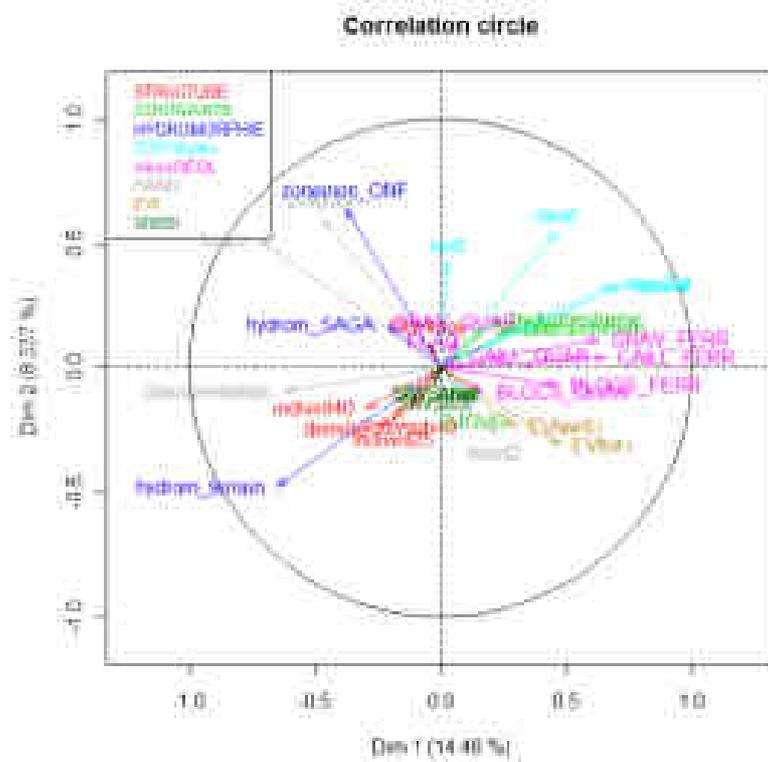


Figure 15. Cercle des corrélations de l'AFM pour les variables quantitatives.

Chaque axe peut revêtir et exprimer un gradient particulier, ainsi :

- L'axe 1 l'ensemble des variables s'exprimant semble suivre une logique topographique et/ou selon les classes de pentes.
- L'axe 2 est représenté principalement par des variables d'hydromorphie et/ou des conditions de drainage.
- L'axe 3 est représenté principalement par les variables de structure.
- L'axe 4 est représenté par les variables de microGEOL et les variables de CONTRAINTE
- L'axe 5 est représenté par le SIWSI.

j. LM et Modèle de prédiction :

Les résultats de la régression linéaire, groupe de données par groupes de données sont présentés sur la page suivante (cf. figure.16).

La colonne de droite permet de renseigner si l'information contenue dans la variable est accessible à distance, c'est-à-dire sans le support logistique et humain d'inventaires terrains.

Suivent les résultats dans un tableau de synthèse des différents modèles statistiques produits (données complètes en annexe de la partie II), d'abord un modèle global sur l'ensemble du massif, puis un modèle pour chaque station du massif forestier défini par la classe topographique.

Le R^2 , le R^2_{adj} et l'AIC renseignent sur la valeur prédictive des différents modèles. De même, les variables les plus influentes sont surlignées en rouge, moyennement influentes en bleu, et peu influentes en noir.

Le modèle général explique 30% de la variation de la biomasse de Counami. Pour chaque niveau topographique la biomasse semble mieux expliquée sur les hauts reliefs (crêtes et plateaux notamment), de grosses difficultés à terminer les processus de calcul sur les bas-fonds et les milieux de pente ont été rencontrées.

Groupe	Variable	Type	% d'explication de la variance de l'AGB	ANOVA (AOV)			Reproductivité
				F value	PR (>F)		
STRUCTURE	Densité	Quantitatives			< 2.2e-15	***	Ces données sont accessibles uniquement par inventaire terrain
	DBHmoy (=BA)				< 2.2e-16	***	
	Densité de DBH < 25				< 2.2e-17	***	
	Densité de DBH < 40				< 2.2e-18	***	
	Densité de DBH >40				< 2.2e-19	***	
HYDROM	Hydrom_SAGA	Semi quantitatives	27%	6,02	0.0145	*	SIG
	hydrom_terrain		73%	16,04	7.35e-05	***	Inventaire terrain / une pporche géomatique sur un MNT précis (LIDAR par exemple) pourrait préduire cette infomation.
	hydrom_ONF		/	/	/	/	SIG
microGEOL	BLOCS_FERR	Semi quantitatives	/	/	/	/	Ces données sont accessibles uniquement par inventaire terrain
	BLOCS_QUAR		/	/	/	/	
	CAILL_FERR		/	/	/	/	
	CAILL_QUAR		13%	1,78	0.182622		
	GRAV_FERR		49%	6,95	0.008727	**	
	GRAV_QUAR		16%	2,26	0.133589		
	PLAQ		22%	3,18	0.075264	.	
CONTRAINTE	Chablis	Semi quantitatives	81%	35	7.081e-09	***	Inventaire terrain / le SIG a déjà fait ses preuves dans la détection des chablis
	Hydromextreme		19%	8,4	0.004021	**	
	Contrainteforte		/	/	/	/	
	DJOUG		/	/	/	/	
TOPOhydro	Topo2id	Quantitatives	45%	20,8	6.779e-06	***	Inventaire terrain / le développement via la géomatique dépend principalement de la capacité à prédire les faibles hydromorphies dans les reliefs
	Topoid		39%	18,3	2.332e-05	***	Inventaire terrain / SIG
	Rapat	Semi	16%	7,6	0.006194	**	Inventaire terrain
	Spat	quantitatives	/	/	/	/	
HAND	Classpentemax	Classes Quantitatives	60%	4,22	0.002301	**	Inventaire terrain / Largement accessible via le MNT
	Hparc	Quantitative	/	/	/	/	SIG
	Potgravi		40%	2,86	0.091471	.	
	Hand		/	/	/	/	
PAYSAGE	Geol1960	Qualitatives	/	/	/	/	Acquis
	GeolBRGM		16%	2,14	0.05945	.	
	Geomorpho		/	/	/	/	SIG
	Physiograph		16%	2,06	0.05087	.	SIG
	Formaid		68%	8,77	1.203e-05	***	Inventaire terrain / une approche selon les outils développables via ERDAS Imagine permettrait d'aller beaucoup plus loin dans le découpage des types forestiers.
EVI	EVI avril	Quantitatives	97%	6	0.0148	*	Télédétection
	EVI tot		3%	0,2	0.6606		
SIWSI	SIWSI avril	Quantitatives	36%	3,8	0.05082	*	Télédétection
	SIWSI mai		12%	1,3	0.25975		
	SIWSI dec		52%	5,5	0.02005	*	
	SIWSI tot		0%	0	0.91106		

4.

Intitulé	Commentaire	R ²	R ² adj	AICC	Variables très fortes	Variables fortes	Variable moyennes
Modèle général	Seule une variable de terrain a été sélectionnée	0.21	0.19	4482	Chablis	Hydrom SAGA Hydrom extrême EVI avril.i	Classe de pente (20°) Hydrom terrain Spat Potentiel Gravitationnel SIWSI avril
Plaine	Peu de chablis ont été fréquentées	0.41	0.35	1191	Formation	Classe de pente (10°) Géologie BRGM	EVI avril SIWSI décembre
Bas-fond	Dès qu'on sort des formations bas-fond au sens de la carte de géomorphologie, l'AGB baisse ; difficulté à produire un modèle	0.42	0.20	351		Géomorphologie	HAND SIWSI moyen
Bas de pente		0.42	0.33	625		Formation Classe de pente (20°) Chablis EVI moyen	
Milieu de pente	Difficulté à produire un modèle ; Création d'une variable de géomorphologie indiquant si on est en condition de colline (effet négatif) ou pas	0.17	0.12	790		Hydrom SAGA	Géomorphologie
Haut de pente	Effet négatif fort des formations convexes	0.56	0.45	662	SIWSI mai SIWSI déc	Chablis Géomorphologie	SIWSI moyen
Plateau	Effet fortement positif sur la biomasse des Grauwacques pour la géologie du BRGM et des Démérara pour la géologie de 1960	0.76	0.68	496	Chablis	EVI avril SIWSI avril EVI moyen Géologie BRGM Géologie 1960	SIWSI décembre
Crête	Effet positif sur la biomasse des Migmatites Caraïbes	0.61	0.51	310	Chablis	Géologie 1960 Hydrom extrême	Hydrom_SAGA

Figure 16. Page précédente : Résumé des régressions linéaires opérées pour chaque groupe de variables. (Méthode Stepwise pour effacer les variables non significatives ($P > 0.1$) ** $P < 0.01$, * $P < 0.5$). En vert foncé les variables fortes et en vert clair les moyennes ; Cette page : résumé des variables sélectionnées par les différents modèles.

Discussion :

Un fort gradient de biomasse se dessine le long des toposéquences du massif de COUNAMI. Cette topographie n'est pas sélectionnée par le modèle général, car exprimée indirectement à travers les paramètres sélectionnés. Effectivement de nombreuses variables semblent liées à cette topographie, et le premier Axe de l'AFM en témoigne. Ces raisons justifient, entre autres, notre choix de définir des stations forestières caractérisées par la position topographique, amenant à une autre segmentation du territoire à une échelle plus fine.

Les variables qui expliquent la spatialisation des niveaux de biomasse sont principalement : la position topographique et les pentes, la carte des chablis, l'hydromorphie apparente pour les bas-reliefs et l'hydromorphie sous-terrain pour les reliefs, l'encaissement localisé, les grandes formations forestières, l'indice SIWSI ('Short Infrared Water Stress Index') et l'indice EVI ('Enhanced Vegetation Index'). D'autres indices pressentis comme intéressants, ont eu des résultats décevants : carte des zones inondables, HAND (Height Above Nearest Drainage).

a. Les limites des calculs de biomasse :

Il a été démontré précédemment (partie I) que la parcelle type COUNAMI était aussi bon estimateur de l'AGB qu'une parcelle de même surface inventoriée en plein. Elle présente également la capacité d'approcher la valeur de l'AGB d'une plus grosse zone avec moins de répétitions. Cependant le maillage du site (400 x 500 mètres) ne propose qu'une placette pour représenter l'AGB de 20 ha. Cette surface est relativement trop faible, et trop sensible à des micro-perturbations telles qu'un chablis ou les micro-variations des conditions topographiques. Ces dernières peuvent expliquer les difficultés que l'étude a rencontrées pour modéliser certaines classes topographiques, comme les milieux de pentes en proie à de nombreuses cassures de pente et micro-conditions changeantes.

Cependant, la disposition homogène des placettes sur COUNAMI n'optimise pas le rendu d'information. La topographie est depuis longtemps considérée comme une condition structurante des forêts tropicales (Clark & Clark, 1999, 2000 ; Laurance & al 1999 ; Bellingham & al, 2000 ; Castilho & al, 2006 ; Slik, 2010), permettant par là même d'expliquer des conditions d'hydromorphie en lien avec la dynamique forestière (Ferry, 2009 ; Robert, 2003 ; Sabatier, 1997) et les compositions floristiques (Baralotto, 2007 ; Ferry, 2010). Ainsi la disposition des placettes optimisée le long de toposéquences, et de plus nombreuses répétitions dans les reliefs présentant de fortes variabilités (28% des plots sont dans les plaines) optimiseraient la qualité de l'inventaire.

Une autre source d'erreur dans notre calcul d'AGB, provient de l'utilisation des médianes des 14 classes du jeu de données CFI. L'utilisation des inventaires individualisés, notamment pour la dernière classe (>107,5cm de DBH – médiane prise à 112.5cm) aurait permis d'approcher des valeurs plus prégnantes, qui auraient probablement abouti à des corrélations plus fortes, voir des modèles plus précis.

Les arbres de plus de 30 cm de DBH peuvent représenter plus de 80% de l'AGB (Chave, 2001), ce qui valorise la logique d'inventaire rapide de COUNAMI. Cependant la biomasse aérienne des forêts Amazoniennes est fortement liée à la densité moyenne des communautés d'arbres, à la densité d'individus par hectare, et la surface terrière (Malhi & al, 2006, Saatchi & al 2007). Les paramètres de prédictions sont dans un ordre d'importance décroissant : le DBH, le WSG, la hauteur, et le type de forêt (Chave, 2004). La position topographique et/ou les pentes peuvent témoigner indirectement de hauteurs moyennes changeantes de la Canopée (Ferry, 2010). Toutefois, le modèle utilisé ne s'appuyant que sur un WSG moyen et les diamètres, les ajouts des WSG spécifiques et/ou des hauteurs devraient être testés. La hauteur pourrait alors jouer positivement car ayant un meilleur effet sur les classes de diamètres élevés, et les WSG pourraient jouer négativement car liés aux faibles diamètres pouvant être portés par les espèces de sous-bois généralement à croissance lente. Dans le même sens critique, Chave et al. (2003) ont démontré que les très faibles diamètres (inférieurs à un DBH de 10 cm), ainsi que les palmiers et les lianes peuvent avoir un effet non négligeable dans l'AGB global d'une forêt. Ainsi le rond central de la méthode COUNAMI pourrait prendre en compte ce type de relevés.

b. Structure et composition floristique :

D'un point de vue structure, la répartition du nombre d'individus dans les classes à tendance à être relativement stable peu importe la variable géographique que l'on met en face. L'utilisation des variables de structure et de topographie par Pélissier et Couzot (2003) pour décrire des gradients floristiques sur COUNAMI est justifiable par l'absence de redondances fortes des deux variables. Cependant elles ne sont pas indépendantes, à contrario des conclusions apportées dans cette même étude. Ainsi, la topographie peut expliquer des tendances à la répartition préférentielle des densités d'individus aux seins des trois classes de diamètres en fonction des positions topographiques :

- les plaines et les bas-fonds ont de plus fortes densités que la moyenne sur les petits diamètres
- les pentes et les crêtes ont de plus fortes densités que la moyenne sur les diamètres moyens ; les crêtes ont une densité globale plus élevée que les autres classes topographiques expliquant la valeur plus haute des biomasses malgré le DBH moyen peu élevé.

- les plateaux ont de plus fortes densités que la moyenne sur les gros diamètres, et un DBH moyen élevé.

Ces conclusions différentes pourraient venir du fait que nous nous sommes appuyés sur 3 grandes classes de DBH, au lieu de 14 classes ne présentant aucune logique en lien avec un stade phénologique, un stade de maturité des arbres, et emprunt à une variabilité intra-classe trop forte.

La ségrégation spatiale observée à l'étude des variables de structure d'une part, et avec les variables floristiques d'autre part, ne sont pas sans rappeler les trois grands zonages déjà décrit sur le site (Pélissier et Couteron, 2003) : une ségrégation Nord Est / Sud Ouest d'une part, et la vallée de la Counamama. Ainsi l'AGB fonctionne différemment selon ces zones, tantôt en fonction des caractéristiques de structure des peuplements de certaines espèces, tantôt en fonction des caractéristiques de structures associables à une différenciation Bas-fond/Reliefs. La définition des dynamiques de successions des bas-fonds (Ferry, 2010), et les compositions particulières qui peuvent s'y dégager (Sabatier, 1990 ; Degranville, 1986 ; Lescure, 1983) permettent d'expliquer en partie la situation.

Il a été observé que les valeurs des indices EVI et SIWSI présentent une forte spatialisation évoluant au fil des mois dans l'année. Ces évolutions sont fonctions des compositions floristiques et des liens avec des positions topographiques particulières, définissant des réponses différentes aux conditions climatiques saisonnières (pluie vs ensoleillement) en termes de stress hydriques et de niveaux d'activité photosynthétique. Les études sur la phénologie des forêts tropicales humides sont relativement rares. Les contraintes techniques d'accès au terrain, les contraintes économiques si l'on opte pour des inventaires forestiers à grande échelle, et les contraintes logistiques, peuvent en être des raisons majeures. Le suivi de la phénologie par télédétection est en passe de devenir une alternative de choix avec les indices EVI et SIWSI.

c. Des stations forestières définissables par la topographie :

De nombreuses variables sont reliées à la topographie, ce qui a regroupé l'ensemble des variables et des groupes de variables sur le premier Axe de l'AFM. De plus, les réponses des forêts aux stimuli de l'environnement sont différentes selon la position sur la toposéquence, trois exemples permettent d'illustrer ces fonctionnements différents :

Exemple 1 : l'effet de la pente est différent selon la situation topographique

Exemple 2 : Les fonctionnements hydriques des sols sont également différents (voir la reclassification de la topographie avec les deux espèces indicatrices)

Exemple 3 : La phénologie également varie fortement (voir les EVI et des SIWSI par niveaux de biomasse)

d. Des variables expliquant la répartition spatiale au sein de ces stations forestières :

Ainsi la position topographique permet d'expliquer une répartition spatialisée des AGB à travers un gradient fort le long de la toposéquence. De manière générale les variables sélectionnées dans le modèle général et dans chaque modèle le long de la toposéquence sont souvent les mêmes. Cependant les effets de ces variables sont parfois différents au sein de ces stations forestières.

L'hydromorphie :

L'hydromorphie des bas-fonds et plaines est une condition qui explique des processus de dynamiques forestières et de contraintes amenant à des biomasses globalement plus faibles (Ferry, 2010). L'hydromorphie dans les pentes régule également faiblement la valeur moyenne de l'AGB probablement pour des raisons de cortèges floristiques inadaptés aux conditions d'asphyxie. Sur les sommets l'hydromorphie témoigne de biomasses bien supérieures expliquant cette fois une disponibilité de la ressource sur des sols à drainages améliorés.

L'hydromorphie et la présence des espèces indicatrices sont fortement corrélées à la topographie. A contrario la couche d'hydromorphie de SAGA, se retrouve sur tous les niveaux topographiques hors plaine, et présente des effets négatifs sur la biomasse qui lui ont valu d'être sélectionnée par certains modèles notamment sur les reliefs. Cette variable semble pouvoir exprimer des situations d'encaissements extrêmes (à travers l'observation de la surface de la Canopée sur le SRTM_30m), expliquant que par le manque de lumière ou des mécanismes de sur-compétitions des valeurs d'AGB sont localement faibles. Ainsi cette variable est complémentaire aux données d'hydromorphie réelle.

Les Contraintes fortes :

Les variables de contraintes, comme définies dans cette étude, influent fortement sur la structure et la biomasse forestière, expliquant ainsi la majorité des valeurs très basses du massif. La présence d'une crique sur la parcelle semble abaisser la valeur de la biomasse par le simple déficit en arbre sur l'air du cours d'eau, car les structures globales ne sont pas modifiées. Néanmoins, la première frange d'arbres (soit un buffer de 10 à 20 mètres selon le diamètre des houppiers des émergents) pourraient présenter des AGB soit plus faibles en vue des situations hydromorphes rendant les sols instables, soit plus forts grâce à l'accès à la lumière provoqué par l'ouverture du cours d'eau. Les observations de terrain semblent proposer le scénario 1 pour les plaines, et le scénario 2 fréquentable mais non systématique dès qu'une légère pente apparaît. Étant donné le réseau hydrographique très dense de la Guyane, il serait intéressant de voir si une prise en compte de ce buffer dans le développement des cartes de biomasse du territoire est nécessaire, au même titre que la prise en compte des ripisylves pour les grands cours d'eau.

Les Djougoun Pete (ou jungle cassée), sont des situations auto-entretenues qui redéfinissent les structures forestières selon un schéma particulier. Rares à ob-

server, cette variable reste intéressante pour expliquer des AGB très faibles, mais non reproductible sans l'observation terrain. A contrario certains travaux (Gibbs, 2007 ; Gond, 2003, 2009, 2011 ; Pennec, 2010 ; Murdiyarso, 2009) ont permis de contribuer au développement d'outils semi-automatisés de télédétection des chablis. Cette variable est ressortie comme forte dans différents modèles, elle constitue un nécessaire à l'évaluation des stocks de Carbone et de la biomasse forestière de Guyane. L'approche peut être soit par spatialisation réelle, ou soit par pondération des valeurs locales d'AGB par niveau d'occurrence des chablis.

La micro-géologie :

La présence de cuirasse limite fortement la production forestière. Or les cuirasses, à proprement parlé, n'ont pas été fréquentées ou non renseignées comme telles lors de l'inventaire, seul les conséquences de l'érosion sur ces cuirasses sont renseignées. Ainsi l'histoire géologique du plateau des Guyanes, veut que l'on retrouve les éléments figurés ferrallitiques de petites tailles sur les reliefs les plus hauts, et par une érosion moins avancées des éléments plus gros sur le bas (Freycon, 2001). Les éléments de types quartziques tendent à se retrouver dans les plaines et dans les lits de cours d'eau. Ainsi les effets décrits sur l'AGB pourraient en réalité découler d'effets indirects du positionnement topographique. Cependant des potentiels effets par la composition chimique des sols ou des contraintes d'enracinement pourraient également expliquer ces effets. Ainsi la cuirasse démantelée en altitude permettrait une meilleure pénétration des racines dans le sol, et les quartzites éléments difficiles à altérer présenteraient des sols pauvres en cations assimilables (Boulet, 1979 ; le Fol, 2001 ; Steege, 2003 ; Bonneau, 2011). D'autres éléments du sol, comme certains minéraux tels que le Phosphore considéré comme un facteur limitant du monde végétal Amazonien, peuvent également avoir un effet fort sur les niveaux de biomasse (Baralotto, 2011). Mais ces informations sont d'accès très restreint à grande échelle.

Le potentiel gravitationnel et pente :

Le potentiel gravitationnel décrit un gradient en cloche. Lorsque la variable a une valeur faible l'AGB l'est également, témoignant de conditions hydromorphes asphyxiantes (les arbres ont les pieds dans l'eau). Lorsque la différence de hauteur crête/parcelle est intermédiaire la valeur de l'AGB est plus élevée, témoignant de pentes moyennes et/ou de bilans hydriques des sols favorables. Lorsque les différences de hauteurs sont trop fortes, la ressource en eau est limitant du fait de la faible capacité de rétention en eau des sols au regard des fortes pentes.

Le potentiel gravitationnel est donc très lié à la pente, qui elle-même tend à décrire le même gradient en cloche, et ces deux variables sont elles mêmes expliquées en partie par la topographie. Comme précisés précédemment, les pentes ont des effets différents selon la situation topographique :

- les pentes faibles sur plateau permettent d'augmenter la biomasse par un drainage favorable des sols, phénomène se produisant également en plaine
- les pentes sur les crêtes abaissent la biomasse par un phénomène inverse, l'eau mobilisable par la végétation étant déjà limitée

- le bas de pente et haut de pente décrivent la tendance moyenne accentuée
- le milieu de pente, présentant généralement des pentes élevées, ne subit aucun effet de celles-ci sur la valeur de la biomasse, probablement en lien avec un cortège floristique adapté
- les bas-fonds sont difficilement interprétables en raison d'effectifs faibles pour chaque niveau de pente.

Les variables paysages :

Les variables de physiographie et de géomorphologie locale vont à contre sens de la logique de segmentation du territoire décrite dans l'introduction. Ainsi, après la segmentation géomorphologique en 84 unités de reliefs relatifs à la carte des habitats (Guitet, à paraître), la segmentation en station en tant qu'unité présentant des traits fonctionnels similaires ne peut pas être approchée par ces deux variables. Ces deux variables ne feraient que répéter un découpage déjà effectué à plus grande échelle sans tenter de définir un habitat selon la définition de conditions homogènes représentatives d'un certain type de structure (postulat de départ). Cependant une information intéressante sort du modèle sur les bas-fonds, qui prend relativement bien en compte l'information apportée par la carte de géomorphologie (Hutter, 2001). Ainsi dès que l'on sort du géomorphisme bas-fond, les AGB ont tendance à baisser, et ce fait s'accroît sur les formations complexes.

Les sols de Guyanes sont considérés comme pauvres, et seules les contraintes physiques liées majoritairement aux conditions d'hydromorphie et de drainage expliquent fortement des variations de la biomasse (Freycon 2002, 2003 ; Filleron, 2003 ; Ferry, 2003). Cependant certains sols semblent expliquer des AGB supérieurs, notamment dans les plaines (Grauwacques et filons de pegmatites), sur les plateaux (Grauwacques et Demerara) et sur les crêtes (Migmatites caraïbes). Malheureusement ces conclusions proviennent de deux cartes de la géologie de Guyane totalement différentes : la géologie de Choubert en 1960 basée sur la pétrochimie, et la géologie du BRGM de 2000 basée sur l'âge des pierres. De plus la carte des potentiels agro-forestiers, à contrario des autres grands PTOM Français, n'existe pas pour la Guyane. Les différents travaux sur les sols Guyanais et leurs potentialités en termes de croissance, font toujours défauts (malgré le programme ECEREX) et anime de vives polémiques entre experts. Les dénominations des types de sols et les classifications fonctionnelles varient d'un auteur à l'autre et dans le temps. Les interprétations en sont rendus difficiles.

Les indices de télédétection

Les variables de télédétection ont présenté un vif intérêt dans l'étape de modélisation. Il n'est pas étonnant d'avoir les mois d'Avril et de Mai d'une part, et le mois de Décembre d'autre part, qui aient été retenus pour le SIWSI. Effectivement, ce sont des mois de transition pluviométrique et saisonnière avec le petit été puis la fin de la saison sèche. Ainsi les stress hydriques sont perçus différemment par des structures forestières et des biomasses d'importances différentes. De même sorte, l'EVI du mois d'Avril témoigne d'un début de reprise en activité chlorophyllienne sur le petit été. Cette reprise varie en termes de rapidité et d'intensité selon la couverture foliaire et donc le nombre d'arbres, selon l'âge de la forêt, selon le cortège

floristique, sa capacité de réponse rapide aux stimuli et la richesse en héliophile... soit en fonction des biomasses et positions topographiques.

Les formations végétales :

La définition des forêts marécageuses et ripicoles est importante pour l'estimation précise de la biomasse des plaines, permettant de décrire des forêts particulières (donc également des habitats particuliers) aux valeurs sensiblement inférieures à la moyenne du massif. La définition d'autres types de formations sur les reliefs pourrait porter également un intérêt. Ainsi une approche avec des logiciels types ERDAS Imagine serait intéressante. Ce type de logiciel est capable d'acquérir de l'intelligence selon l'information implémentée, et peut permettre, au regard des nombreuses applications développées par Conservation International, de définir des contours d'unités forestières relativement très homogènes en fonction de critères tels que l'aspect granulométrique, les dessins fractales, et la colorimétrie de la canopée, de hauteur moyennes, de structures forestières, d'indices phénologiques (EVI, SIWSI)...et ainsi définir des unités de biomasses homogènes.

e. Des variables attendues mais décevantes :

La variable des zones inondables (voir en annexe RT 4) n'est pas assez exigeante. Ainsi de trop grandes surfaces sont prises en comptes (voir annexe cartographique), représentant très fréquemment des conditions non suffisamment contraignantes d'engorgements pour impacter la biomasse, car de durée trop courte. S'appuyant sur le SRTM 90 mètres, l'erreur est conséquente pour des placettes de 75 mètres de long.

L'indice HAND ne semble pas être un aussi bon estimateur de la structure forestière de Counami que dans les forêts du centre de l'Amazonie (Rennó, 2008). Cependant le modèle numérique de terrain imparfait qu'est le SRTM de la Nasa, sa précision à un pixel de 30 mètres, le réseau hydrographique très dense sur Counami, et les faibles reliefs peuvent faire de cet indice une variable erronée dans notre cadre d'étude. La logique de l'indice, alliant pourtant potentiel gravitationnel et une représentativité des contraintes physiques des pentes, paraît séduisante. Ainsi cet indice devrait être testé en conditions plus montagneuses que la forêt de Counami, et/ou relativement à des cours d'eau de plus grande taille.

La hauteur était attendue pour décrire un changement de type de drainage. Effectivement, un pallier à 45 mètres semble de manière stable expliquer un changement du drainage latéral (ou bloqué) vers le drainage profond sur la partie supérieure (Freycon, 2001). Ces différents types de drainages étaient pressentis comme potentiels responsables de variations des structures et des biomasses forestières (Freycon, 2003 ; Lefol, 2004 ; Ferry, 2003). Cependant les variations de biomasses selon la hauteur de la parcelle semblent être expliquées par la fréquentation accentuée des plateaux sur les fortes valeurs, soit les hauteurs moyennes.

f. Vers une estimation des services écosystémiques de l'ensemble de la forêt Guyanaise – la carte des stocks de Carbone :

Clark et Clark (1999) ont étudié les caractéristiques des sols de trois forêts Néotropicales pour expliquer la variation spatiale de la biomasse. Les plots utilisés, 0.35 ± 0.5 ha selon le site, étaient suffisant pour atteindre des coefficients de variation inférieurs à 10% pour le DBH avec seulement 6 répétitions. Ainsi à la vue du nombre de répétitions qu'offre le dispositif de Counami, soit 411 plots, de nombreuses variables environnementales permettent d'expliquer en partie la répartition spatiale de l'AGB. Le cumul des plots représente par ailleurs 123.3 ha pour 12 240 ha de massif. Ces chiffres nous confortent dans l'utilisation des inventaires forestiers de la Guyane par l'ONF (papetier, 1/1000^{ème} ...) pour une évaluation régionale des services écosystémiques de la Guyane que sont les stocks de biomasse et de Carbone forestier.

La recherche d'un modèle global sur Counami pour expliquer la biomasse ne permet pas d'arriver à un niveau prédictif suffisant. La topographie définissant les stations forestières du massif permettent de gagner en compréhension et précision. Mais la variabilité à l'intérieur de ces stations est toujours grande et expliquée par d'autres variables environnementales. Ainsi peut-on se poser les questions : A quel niveau d'observation doit-on s'arrêter pour une évaluation à l'échelle locale ou régionale? Les valeurs moyennes des AGB par classe topographique et pour les 84 unités de reliefs ne permettraient-elles pas d'estimer les stocks de la Guyane avec une précision suffisante ?

Il reste donc à présent à : i. Voir la force des variables sélectionnées dans une unité de relief du même paysage et intégrer les variations climatiques, notamment la pluviométrie (Segen, 2011 ; Baralotto, 2011) ; ii. Voir si dans les autres paysages les variables prédictives sont les mêmes ; iii. Décider du niveau de définition pour la réalisation de la carte de la biomasse forestière de Guyane.

BIBLIOGRAPHIE :

Akaike, H. (1974). "A new look at the statistical model identification". *IEEE Transactions. Transactions on Automatic Control* 19 (6): 716–723.

Asner, P. Mascaro, J. Knapp, D. Clark, J. Jacobson, J. Kennedy-Bowdoin, T. Balaji, A. Paez-Acosta, G. Victoria, E. Secada, L. Valqui, M. Hughes, R. (2010), 'High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon', *PNAS*, vol. 107 - n°38, pp. 16738-16742.

Baccini, A. Laporte, N. Goetz, S. Sun, M. Dong, H. (2008). 'A first map of tropical Africa's above-ground biomass derived from satellite imagery. *Environmental Research Letters*.

Baraloto, C., Morneau, F., Bonal, L., Blanc, L. & Ferry, B. (2007) Seasonal water stress tolerance and habitat associations within four Neotropical tree genera. *Ecology*, 88, 478–489.

Baraloto, C. Rabaud, S. Molto, Q. Blanc, L. Fortunel, C. Davila, N. Mesones, I. Rios, M. Valderrama, E. Fine, P. (2011), 'Geographic and environmental determinants of aboveground biomass in contrasting Amazonian forests', *Global Ecology and Biogeography - A journal of Macroecology*.

Bellingham, P.J. & Tanner, E.V.J. (2000) The influence of topography on tree growth, mortality, and recruitment in a tropical montane forest. *Biotropica*. 32, 378–384.

Bonneau, M. (2011). *La forêt de Guyane Française*. Ouvrage, Lavoisier.

Burnham, K. P., and Anderson, D.R. (2002). *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach*, 2nd ed. Springer-Verlag. ISBN 0-387-95364-7.

Burnham, K. P., and Anderson, D.R. (2004), "Multimodel inference: understanding AIC and BIC in Model Selection", *Sociological Methods and Research*, 33: 261-304.

Clark, D. B. Clark, D. A., (1999). Landscape-scale variation in forest structure and biomass in a tropical rain forest. *Forest Ecology and Management*, 137, pp. 185-198.

Claeskens, G, and N.L. Hjort (2008). *Model Selection and Model Averaging*, Cambridge.

De Castilho, C. V. Magnusson, W. E. Araujo, R. N. O. Luizao R, C. C. Luizao, F. J. Lima, A. P. Higuchi, N., 2006. Variation in aboveground tree live biomass in a central Amazonian Forest: Effects of soil and topography. *Forest Ecology and Management*, 234, pp. 85-96.

Dewalt, S. Chave, J. (2004), 'Structure and Biomass of Four Lowland Neotropical Forests', *Biotropica*, vol. 36, pp. 7-19.

Ferry, B. Paget, D. (2003), 'Genèse et fonctionnement hydrique des sols sur socle cristallin en Guyane', *Revue forestière française - connaissance et gestion de la forêt guyanaise - numéro spéciale 2003*, pp. 37-59.

Ferry, B. Morneau, F. Bontemps, J. D. Blanc, L. Freycon, V. (2009). Higher treefall rates on slopes and waterlogged soils result in lower stand biomass and productivity in a tropical rain forest. *Journal of Ecology*. 98, pp. 106-116.

Ferry, B. Morneau, F. Bontemps, F. Blanc, L. Freycon, V. (2010), 'Higher treefall rates on slopes and waterlogged soils result in lower stand biomass and productivity in a tropical rain forest. *Journal of Ecology*, pp. 106-116.

Filleron, J. Le Fol, J. Freycon, V. (2003), 'Diversité et originalité des modelés forestiers guyanais', *Revue forestière française - connaissance et gestion de la forêt guyanaise - numéro spéciale 2003*, pp. 19-36.

Freycon, V. Sabatier, D. Paget, D. Ferry, B. (2003), 'Influence du sol sur la végétation arborescente en forêt Guyanaise : état des connaissances', *Revue forestière française - connaissance et gestion de la forêt guyanaise - numéro spéciale 2003*, pp. 60-73.

Gond, V. Féau, C. Pain-Orcet, M. (2003), 'Télédétection et aménagement forestier tropical : les pistes d'exploitation', *BFT - Bois et Forêts des Tropiques*, vol. 275, pp. 29-37.

Gond, V. Freycon, V. Molino, J. Brunaux, O. Ingrassia, F. Joubert, P. Pekel, J. Prévost, M. Thierron, V. Trombe, P. Sabatier, D. (2011), 'Broad-scale spatial pattern of forest landscape types in the Guiana Shield. 10.p', *ELSEVIER - International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*.

Freycon, V. Hosgood, N. Toutchkov, M. (2002), *ETUDE DE L'INFLUENCE DU SOL ET DU SUBSTRAT GEOLOGIQUE SUR LA STRUCTURE D'UN PEUPEMENT FORESTIER GUYANAIS (Massif de Counami)*, CIRAD & ENGREF.

Gibbs, H. Brown, S. Niles, J. Foley, J. (2007), 'Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. 13.p', *Environmental Research Letters*.

Hoff, M. (1997). *Typologie provisoire des milieux naturels des Départements d'Outre-mer français, base sur Corine Biotope et la "classification of palaeartic habitats" du Conseil de l'Europe. Rapport MNHN Institut d'Ecologie et de Gestion de la Biodiversité. 38p. (Guitet & al, 2011)*

Justice, C.O., Vermote, E. and Townshend, J.R.G., 1998, *The MODIS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, pp. 1228–1249.

Laurance, W. F. Fearnside, P. M. Laurance, S. Delamonica, P. Lovejoy, T. Rankin-de-Merona, J. Chambers, J. Q. Gascon, C. (1999). *Relationship between soils and Amazon forest biomass: a landscape-scale study. Forest Ecology and Management*. 118, pp. 127-138.

Malhi, Y., Wood, D., Baker, T.R., Wright, J., Phillips, O.L., Cochrane, T. et al. (2006) *The regional variation of aboveground live biomass in oldgrowth Amazonian forests. Global Change Biology*, 12, 1107–1138.

Muller-Landau, H.C. (2004) *Interspecific and inter-site variation in wood specific gravity of tropical trees. Biotropica*, 36, 20–32.

Murdiyarsa, D. Skutsch, M. Guariguata, M. Kanninen, M. Luttrell, C. Verweij, P. Martins, O. (2009), 'How do we measure and monitor forest degradation?', in *Moving Ahead with REDD - Issues, Options and Implications*, ed. CIFOR, CIFOR, pp. 99-107.

Paget, D. 1999. *Etude de la diversité spatiale des écosystèmes forestiers Guyanais. Réflexion méthodologique et application. Doctorat de l'Univ. ENGREF. 155p Peres 1999.*

Paoli, G. & Curran, L. (2007) *Soil nutrients limit fine litter production and tree growth in mature lowland forest of Southwestern Borneo. Ecosystems*, 10, 503–518.

Pennec, A. Gond, V. 2010. *Tropical forest phenology in French Guiana from MODIS time series. , Remote Sensing Letters*, vol. 2, n°4, pp. 337-345.

Pérot, T. 1999, 'Poster : Aménagement de la forêt de Counami -Présentation et méthode d'inventaire forestier', in , ONF, CIRAD, Sylvolab.

Phillips, O.L., Hall, P., Gentry, A.H., Sawyer, S.A. & Vasquez, R. (1994) Dynamics and species richness of tropical rain-forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 91, 2805–2809.

Phillips, O.L., Baker, T.R., Arroyo, L., Higuchi, N., Killeen, T.J., Laurance, W.F. et al. (2004) Pattern and process in Amazon tree turnover, 1976–2001. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences*, 359, 381–407.

Polidori, L. Gond, V. Proisy, C. Trichon, V. 2003, 'Télédétection et caractérisation des paysages amazoniens', *Revue forestière française - connaissance et gestion de la forêt guyanaise - numéro spéciale 2003*, pp. 101-117.

Robert, A. (2003) Simulation of the effect of topography and tree falls on stand dynamics and stand structure of tropical forests. *Ecological Modelling*, 167, 287–303.

Sabatier D., Blanc L., Bonal D., Couteron P., Domenach A., Freycon V., Gond V., Guehl J. , Laffite-Olano A. , Le Fol A., Molino J., Nicolini E., Ollier S., Pelissier R., Prevost M., Proisy C., Roggy J., Theveniaut H. et Trichon V. 2007. Evaluation Multi-Echelles de la diversité spécifique, structurale et fonctionnelle des arbres en forêt Guyanaise : Prise en compte du substrat géologique, des sols et de la dynamique sylvi-génétique. Rapport final programme Ecotrop du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Cayenne, Guyane Française, 122p.

Sabatier D., Grimaldi M., Prévost M.-F., Guillaume J., Godron M., Dosso M. & Curmi P., (1997). The influences of soil cover organization on the floristic and structural heterogeneity of a Guianan rain forest. *Plant Ecology* 131: 81-108.

Sabatier, D. 2001, Contrat Etat-Region (2000-2006) - Projet de Recherche 2002-2006 - INTITULE du projet : Caractériser l'écosystème forestier guyanais pour mieux le gérer – sous projet : Approche Multi-Echelles (AME).

Sabatier, D. Freycon, V. (2001), Rapport Final - A M E - Analyse multi-échelles du couvert forestier Guyanais - Première phase, Silvolab GUYANE.

Shugart, H. Hall, F. (2010), 'Importance of structure and its measurement in quantifying function of forest ecosystems. 16.p', *Journal of Geophysical Research*, vol. 115.

Slik, J. Brearley, F. Cannon, C. Forshed, O. Kitayama, K. Nagamasu, H. Nilus, R. Payne, J. Paoli, G. Poulsen, A. Raes, N. Sheil, D. Sidiyasa, K. Suzuki, E.. (2010), 'Environmental correlates of tree biomass, basal area, wood specific gravity and stem density gradients in Borneo's tropical forests', *Journal of Macroecology*, vol. 19, pp. 50-60.

Stegen JC, Swenson NG, Valencia R, Enquist BJ, Thompson J (2009) Above-ground forest biomass is not consistently related to wood density in tropical forests. *Global Ecology and Biogeography* 18: 617-625.

Stegen, J. Swenson, N. Enquist, B. White, E. Phillips, O. Jorgensen, P. Weiser, M. Mendoza, A. Vargas, P. (2011), 'Variation in above-ground forest biomass across broad climatic gradients. 11.p', *Global Ecology and Biogeography*.

Yang, Y. (2005). "Can the strengths of AIC and BIC be shared?", *Biometrika*, 92: 937-950.

Wagner, F. Rutishauser, E. Blanc, L. Herault, B. 2010, 'Effects of plot size and census interval on descriptors of forest structure and dynamics. BIOTROPICA journal compilation 2010.

ANNEXES : RESULTATS DES MODELES

Modèle général toutes variables confondues – $R^2= 0.21 / R^2_{adj} = 0.19 / AIC = 4482$

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	189.649735	62.459573	3.036	0.00255 **
DJOUG	28.586247	20.303446	1.408	0.15993
chablis	-32.366999	5.780984	-5.599	4.03e-08 ***
classpentemexp 10	16.849952	8.941370	1.884	0.06023 .
classpentemexp 20	17.350065	8.453595	2.052	0.04079 *
classpentemexp 30	-4.932357	9.312382	-0.530	0.59665
classpentemexp 40	-2.113542	9.172402	-0.230	0.81788
hydromextreme	34.393795	12.412689	2.771	0.00585 **
hydrom_SAGA	23.651176	7.650745	3.091	0.00213 **
hydrom_terrain	16.616503	8.184441	2.030	0.04300 *
spat	-7.457014	3.168322	-2.354	0.01908 *
potgravi	-0.920486	0.361207	-2.548	0.01120 *
EVIavril.i	-0.017952	0.006209	-2.891	0.00405 **
SIWStavril	113.177087	40.565533	2.783	0.00704 *

Plaine – $R^2= 0.41 / R^2_{adj}= 0.35 / AIC = 1191$

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	358.26430	58.63711	6.110	1.97e-08 ***
formaidf.marecageuse	-52.98643	12.85650	-4.121	7.83e-05 ***
formaidf.ripicole	-72.65333	26.55072	-2.736	0.00736 **
formaidf.soldrainé	-23.34162	13.03509	-1.791	0.07640 .
classpentemexp 10	64.39285	20.20573	3.187	0.00192 **
geol2006Demerara	19.22385	17.85740	1.077	0.28431
geol2006filons.basal.microgab.tholé	71.85212	23.08049	3.113	0.00242 **
geol2006Grauwacques	41.60462	16.20018	2.568	0.01172 *
geol2006monzogra.métal.tar.pegm	28.18275	18.95934	1.486	0.14033
chablis	-16.98659	9.43560	-1.800	0.07486 .
Hparc	-1.13339	0.58685	-1.931	0.05630 .
EVIavril.i	-0.02551	0.01098	-2.324	0.02217 *
SIWSidec	261.16425	106.30027	2.457	0.01576 *

Bas-fond – $R^2= 0.42 / R^2_{adj}= 0.20 / AIC = 351$

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	931.1947	272.8854	3.412	0.00250 **
geol1960Migmatite Caraibe	28.2677	19.4914	1.450	0.16109
geomorphoform.comp.interf.inf60m.convex.massive	-97.5927	52.6452	-1.854	0.07723 .
geomorphoform.comp.interf.inf60m.plat.cret	-137.4735	39.7798	-3.456	0.00225 ***
geomorphoform.comp.interf.sup60m.chainons.convex	-245.0563	83.1185	-2.948	0.00743 **
geomorphoform.simple.col.plaine.som.convexe	-69.7265	53.0215	-1.315	0.20203
geomorphoform.simple.col.planchersup.som.tab.crete	-146.2541	55.6909	-2.626	0.01542 *
hydrom_terrain	-33.9405	24.6270	-1.378	0.18200
hand2	1.5470	0.8137	1.901	0.07044 .
SIWStot	-1730.8111	876.8250	-1.974	0.06107 .

Bas de pente – $R^2= 0.42 / R^2_{adj}= 0.33 / AIC = 625$

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-371.95628	224.84264	-1.654	0.1045
formaidf.soldrainé	117.46518	45.08558	2.605	0.0121 *
classpentemexp 10	78.79592	44.61762	1.766	0.0836 .
classpentemexp 20	96.33471	45.24637	2.129	0.0383 *
classpentemexp 30	63.75410	45.95317	1.387	0.1716
classpentemexp 40	55.04160	46.23300	1.191	0.2396
chablis	-33.05546	13.27166	-2.491	0.0162 *

Milieu de pente – $R^2= 0.17 / R^2adj= 0.12 / AIC = 790$

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
temppascal	28.9309	15.6875	1.844	0.06951 .
potgravi	-0.9422	0.5880	-1.602	0.11371
SIWSImai	-192.3194	128.7215	-1.494	0.13978

Haut de pente – $R^2= 0.56 / R^2adj=0.45 / AIC = 662$

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	321.990	168.132	1.915	0.061449 .
geomorphoform.comp.interf.inf60m.convex.massive	10.683	20.959	0.510	0.612579
geomorphoform.comp.interf.inf60m.plat.cret	14.141	16.553	0.854	0.397184
geomorphoform.comp.interf.sup60m.chainons.convex	-42.452	18.148	-2.339	0.023537 *
geomorphoform.comp.interf.sup60m.som.tabu	3.252	29.081	0.112	0.911441
geomorphoform.simple.col.plaine.som.convexe	-196.548	47.977	-4.097	0.000160 ***
geomorphoform.simple.col.planchersup.som.convexe	-68.569	34.124	-2.009	0.050137 .
geomorphoform.simple.col.planchersup.som.tab.crete	40.009	46.793	0.855	0.396786
chablis	-48.049	17.832	-2.695	0.009683 **
hydrom_SAGA	36.556	19.496	1.875	0.066882 .
SIWSImai	471.862	127.616	3.698	0.000559 ***
SIWSIdec	759.140	168.741	4.499	4.34e-05 ***
SIWSItot	-1366.588	576.992	-2.368	0.021936 *

Plateau – $R^2= 0.76 / R^2adj=0.68 / AIC = 496$

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-321.05063	181.59552	-1.768	0.08555 .
geol1960Coswine	45.74707	44.81165	1.021	0.31413
geol1960Demerara	203.23809	66.74102	3.045	0.00433 **
geol1960Migmatite Caraibe	-19.81359	12.97029	-1.528	0.13535
geol2006gra.peg.	152.98576	61.35039	2.494	0.01738 *
geol2006Grauwacques	168.74440	56.52070	2.986	0.00507 **
geol2006monzogra.metal.tar.pegm	93.25091	58.24914	1.601	0.11814
chablis	-64.92344	12.44311	-5.218	7.71e-06 ***
EVIavril.i	-0.04949	0.01424	-3.475	0.00135 **
EVItot.i	0.12558	0.04138	3.035	0.00445 **
SIWSIavril	343.47984	105.00878	3.271	0.00237 **
SIWSIdec	358.37236	139.30627	2.573	0.01437 *

Crête – $R^2= 0.61 / R^2adj=0.51 / AIC = 310$

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-339.61	207.93	-1.633	0.117305
geol1960Migmatite Caraibe	72.23	20.58	3.511	0.002079 **
geol1960Orapu	-12.01	46.30	-0.259	0.797815
chablis	-95.66	22.66	-4.222	0.000382 ***
hydromextreme	144.66	47.87	3.022	0.006486 **
hydrom_SAGA	87.04	35.90	2.425	0.024437 *
SIWSItot	923.09	523.21	1.764	0.092227 .

RT N°1 : COUNAMI, DES PARCELLES D'INVENTAIRE RAPIDE AU DESIGN TAILLE POUR L'ESTIMATION DE LA BIOMASSE FORESTIERE.

Résumé

Dans le processus de montage d'un projet Carbone, l'évaluation des risques est importante. Ces risques peuvent se retrouver dans des thématiques interdisciplinaires très diverses (foresterie, agronomie, sociologie, climatologie, économie...), et se retrouver sur différents niveaux d'implémentation de ce processus en tant que points de blocages : définition du scénario de référence et additionalité effective, permanence, monitoring du projet... Ainsi ces blocages relèvent tous d'incertitudes scientifiques. Pour la maîtrise des risques et pour la valeur d'un projet devant un label, la question du design expérimental des inventaires forestiers et de leurs valeurs prédictives est indubitablement le point le plus surveillé (Bellassen, 2009 ; Locatelli, 2008). La qualité de l'inventaire devrait constituer le socle incontournable d'une première réflexion, avant que toute action et décision de mise en œuvre d'un projet soient entreprises. Cependant la conditionnalité économique de meilleure efficacité tranche pour des dispositifs souvent un peu légers et imprécis.

Qu'il soit question de séquestration Carbone ou de déstockage par conversion des terres (LULUCF), ou par préservation des stocks existants et leur enrichissement (REDD+) le type d'inventaire et sa méthodologie associée restent la base d'une évaluation initiale et d'un suivi efficaces. En ce sens en Guyane Française, le massif forestier de Counami (inventorié dans les années 2000), présentait un dispositif atypique notamment par le format des placettes d'inventaire destinées à l'estimation rapide et spatialisée des volumes de gros bois d'œuvre à l'échelle du massif (12 000 ha). Nous nous sommes donc interrogés sur la qualité prédictive des valeurs de biomasse de ce type de plots.

La capacité à estimer l'AGB par ces placettes de 0.3 ha, subdivisées en 3 sous-placettes où les classes de diamètres inventoriées sont différentes, a été testée à travers le calcul des Coefficient de Variation (CV) et des Pourcentage de Déviance (PD). Entrant dans la catégorie des inventaires rapides, ces placettes se sont avérées être aussi bon estimateur du stock de Carbone que des inventaires en plein à surfaces équivalentes, et dans 6 habitats différents de la Guyane. Ce dispositif s'est également avéré être légèrement meilleur estimateur pour de plus grandes surfaces. Au final trois fois moins d'arbres doivent être comptabilisés pour atteindre des Coefficients de Variation (CV) ou des Pourcentages de Déviance (PD) inférieurs à 10% ce qui représente un gain en temps et économique considérable. Il est cependant un très mauvais estimateur des niveaux de biodiversité, se focalisant sur les diamètres supérieurs il néglige certaines espèces de petites tailles et/ou rares.

Abstract

In the process of creating a carbon project, risks assessment is important. These risks may be in a variety of interdisciplinary themes (forestry, agronomy, sociology, climatology, economy ...) and find themselves on different levels of implementation of this process as sticking points: baseline scenario definition, additionality proofs, project monitoring... These blocks are all from scientific uncertainties. For risk control and for project value face to Label, the question of experimental design of forest inventories and their predictive value is undoubtedly the highest point being analyzed (Bellassen, 2009 ; Locatelli, 2008). The quality of the inventory should provide the basis for a first reflection before that all actions and decisions are undertaken for project implementation. However, the improved efficiency of economic conditionality pushes to the use of devices often a bit lighter and imprecise.

Whether it's carbon sequestration by land use change (LULUCF), or existing stocks preservation and/or enrichment (REDD +), inventory types remain the basis of an initial assessment and effective monitoring. In this way in French Guiana, the forest of Counami (inventoried in the 2000's), has an unusual feature in the format of the inventory plots destiny to achieve a rapid and spatial estimation of the volume of the biggest commercial wood at a mesoscale (12 000 ha). We questioned the predictive quality of such plots for the forest biomass estimations.

The AGB predictive capacity of these 0.3 ha plots, divided into three sub-plots where the different classes' sizes of DBH have been inventoried, were tested by calculating the Coefficient of Variation (CV) and Percentage of Deviance (PD). Fall into the category of fast inventory methods, these plots were found to be as good estimator of the stock of carbon as inventories in full field with equivalent surfaces, for 6 different habitats. This device also is a better estimator for larger surfaces. In the end, three times fewer trees need to be accounted to achieve CV or PD below 10%, which represents a considerable gain in time and money. However, it is a very bad estimator of biodiversity levels, focusing on the larger sizes it overlooks some small and / or rare species.

Introduction

Toute la question des inventaires forestiers en Amazonie se définit par une composante économique car on ne peut inventorier toute la forêt, par une composante logistique car les cœurs de forêts sont difficilement accessibles, et par une composante de temps. Ainsi la mise en place d'inventaires doit se rendre la plus efficace possible selon ces trois niveaux de contraintes, et en fonction des objectifs que l'on se fixe (estimation de la biomasse, des niveaux de biodiversités, des processus forestiers...).

Il n'y a que peu de consensus qui définissent des méthodes d'échantillonnage efficaces et fiables, pour réaliser des mesures suffisamment représentatives à la fois de la biodiversité et de la biomasse d'un site (Zeide, 1980). Conventionnellement, la méthode communément admise est celle du 1 ha plot (Phillips & al, 2009) comme suggérée par la FAO (FAO, 1981). Cependant cette taille d'inventaire est critiquée pour la faible répétabilité à une grande échelle en forêt tropicale (Phillips & al, 2009), pour des questions de coûts d'implémentation et parce que cela intègre des erreurs locales comme celles des espèces agrégatives (Hubbel & Foster, 1983).

Quand la variance augmente au sein d'une population (CV), la différence entre deux populations (PD) devient plus difficile à détecter, et des plots de plus grande taille sont alors requis pour produire des statistiques fiables (Hall et al, 1998 ; Chave et al, 2003). Wagner & al (2010) ont travaillé sur la taille minimale des plots et leur niveau de répétition pour optimiser les inventaires forestiers. Ils ont étudiés les intervalles de confiance et la taille des plots, sur l'estimation de paramètres de structure forestière (densité, DBH, AGB), et de paramètres de dynamique forestière (taux de croissance, mortalité, recrutement, flux de biomasse). L'analyse comparative du coefficient de variation amène à la conclusion principale qu'un plot de 2ha représente la taille minimale idéale de prédiction des deux types de paramètres sous un seuil d'erreur de 10%.

Cependant, sur des aspects strictement temporels statiques, Baralotto & al (2011) ont comparé cinq tailles et formes d'inventaires différents. L'étude s'est focalisée sur six forêts Néotropicales du Brésil, du Surinam et de la Guyane Française, représentatives chacune de structures, richesses et compositions floristiques particulières. La performance de la méthode d'échantillonnage a

été évaluée par le coefficient de variation de l'AGB et du niveau de biodiversité forestière (nombre de Hill). Les aspects 'effort d'implémentation' ont été également comparés. Ainsi, pour une certaine surface échantillonnée, l'utilisation d'un grand nombre de parcelles plus petites qu'un hectare donne un meilleur coefficient de variation que quelques grosses parcelles. La méthode d'inventaire du Gentry (Phillips et al, 2003a ; 2003b), modifiée à 0.5 ha par Baralotto & al (à paraître) semble être de loin la méthode la plus efficace pour estimer simultanément la biodiversité et l'AGB.

Dans le même sens, Clark & Clark (1999) ont étudié les caractéristiques des sols de 3 forêts Néotropicales pour expliquer la variation spatiale de la biomasse. Les plots utilisés, 0.35 ± 0.5 ha selon le site, étaient suffisants pour atteindre des coefficients de variation inférieurs à 10% pour le DBH moyen ('Diameter Breast Height') avec seulement 6 réplifications pour chacun des types de sol.

Les institutions de la Guyane, au regard des positionnements de l'Etat sur la scène internationale pour le post-Kyoto, commencent à fortement faire ressentir leurs intérêts pour une évaluation rapide et précise des stocks de Carbone forestier. A ce juste titre, un projet de plateforme de mutualisation des moyens techniques et des données forestières, en vue du développement d'une REDD+ sur le plateau des Guyane, est en passe de voir le jour avec l'ONFI (Bouyer, 2010). La question de l'utilité des inventaires destinés à l'aménagement existants (papier, 1/1000^{ème} ...), et des méthodologies pour de futurs inventaires orientés biomasse, est cruciale.

Dans ce sens, nous avons testé la qualité d'un dispositif atypique utilisé en Guyane : les parcelles du massif de COUNAMI inventoriées entre les années 1997 et 1999 par l'ONF et le CIRAD. Ce dispositif était très orienté sur l'estimation des gros volumes de bois d'œuvre, avec des parcelles subdivisées en trois sous-parties représentatives chacune de classes de diamètres différentes. Plusieurs études ont été portées sur ce massif (Couteron, 2003 ; Mapaga, 2004 ; Freycon, 2002 ; Baltzinger, 2001), cependant personne n'a encore pris le temps de tester la valeur prédictive d'un tel design. Ainsi, en partant du modèle de Chave (2004) très bien calibré pour les estimations de l'AGB ('Above Ground Biomass') en forêt Guyanaise, et aux regards des travaux déjà fournis au sein de

l'UMR Ecofog (Baralotto, 2011 ; Wagner, 2009), nous nous sommes donc fixé l'objectif de compléter cette lacune. A travers l'étude des Coefficients de Variation (CV) et des Pourcentages de Déviance (PD), nous avons étudié la valeur prédictive de l'AGB de ces parcelles de 0.3 ha comparativement à un inventaire en plein pour 6 habitats différents de la Guyane, ainsi que la valeur prédictive pour de plus grandes surfaces. La question des gains de temps lors de la réalisation de ces placettes simplifiées s'est également posée, au même titre que l'estimation des niveaux de biodiversité.

Matériel et Méthodes

Design du dispositif type Counami :

Une parcelle se subdivise en 3 sous-parties (cf. figure.2) :

- au centre de la placette, un cercle de 11.28 mètres de diamètre (sous-plot 'a' de 0.04 ha) où les arbres de plus 7.5 cm de DBH ont été mesurés.
- au Nord de la placette, une sous-parcelle de 40 × 37.5 mètres (sous-plot 'b' de 0.13 ha) où les arbres au-dessus de 25 cm de DBH ont été mesurés.
- au Sud de la placette, une sous-parcelle de 40 × 37.5 mètres (sous-plot 'c' de 0.13 ha) où les arbres au-dessus de 40 cm de DBH ont été mesurés.

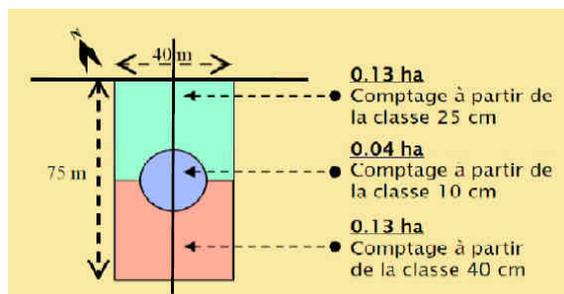


Figure 1 : Schéma d'une parcelle d'inventaire du site ONF de Counami

Calcul de la biomasse aérienne :

L'AGB ("Above Ground Biomass"), est calculé pour chaque arbre de chaque parcelle selon le modèle de régression biomasse-diamètre de Chave (2004) spécifique aux forêts humide.

$$\langle AGB \rangle_{est} = \rho \times \exp(-1.499 + 2.148 \ln(D) + 0.207(\ln(D))^2 - 0.0281(\ln(D))^3)$$

Un WSG moyen («Wood Specific Gravity») de 0.7 a été choisi pour le calcul, car considéré comme suffisamment représentatif de ce type de forêt. Les WSG spécifiques n'ont pas pu être utilisés. Effectivement les grilles d'inventaires floristiques de Counami sont difficilement juxtaposables, sans dégrader la donnée, aux autres inventaires floristiques à la nomenclature canevacée, et remise à jour récemment.

Habituellement la biomasse est calculée sur des inventaires en plein. Dans le cas du protocole d'inventaire de Counami il faut d'abord sommer chaque arbre pour chaque sous-placette et affecter un coefficient multiplicatif de surface :

- pour l'AGB sommé des arbres de 7.5 à 25 de DBH cm (sous-parcelle 'a'), un facteur multiplicatif de 0.3/0.04 est nécessaire pour estimer leur contribution globale à la parcelle de 0.3 ha
- pour l'AGB sommé des arbres de 25 à 40 de DBH cm (sous-parcelle 'a' et 'b'), un facteur de multiplicatif de 0.3/0.17 est nécessaire pour estimer leur contribution globale à la parcelle de 0.3 ha
- pour l'AGB sommé des arbres supérieur à 40 de DBH étant inventorié dans l'ensemble des sous-parcelles, il n'y a pas besoin de coefficient multiplicatif.

Les valeurs des 3 classes de diamètres sont ensuite additionnées, et le résultat de la parcelle est ramené à la T/ha, unité conventionnellement utilisée.

Localisation des sites d'étude

Plusieurs dispositifs de parcelles forestières expérimentales suivies par des inventaires systématiques existent en Guyane Française. Le centre de recherche du CIRAD, et l'ONF en tant que gestionnaire des forêts de droit privé de l'Etat, ont développé conjointement un network de ces parcelles (GUYAFOR – cf. figure.3).

Etude de l'impact de l'exploitation forestière, bio-séquestration du carbone, et changements climatiques sont des thématiques centrales de ces dispositifs. Chaque site propose un schéma expérimental particulier avec souvent au moins une parcelle témoin « indemne » d'impacts anthropiques. Ces différents dispositifs sont situés dans des aires géographiques, sur des substrats et des habitats différents (cf. figure.4).

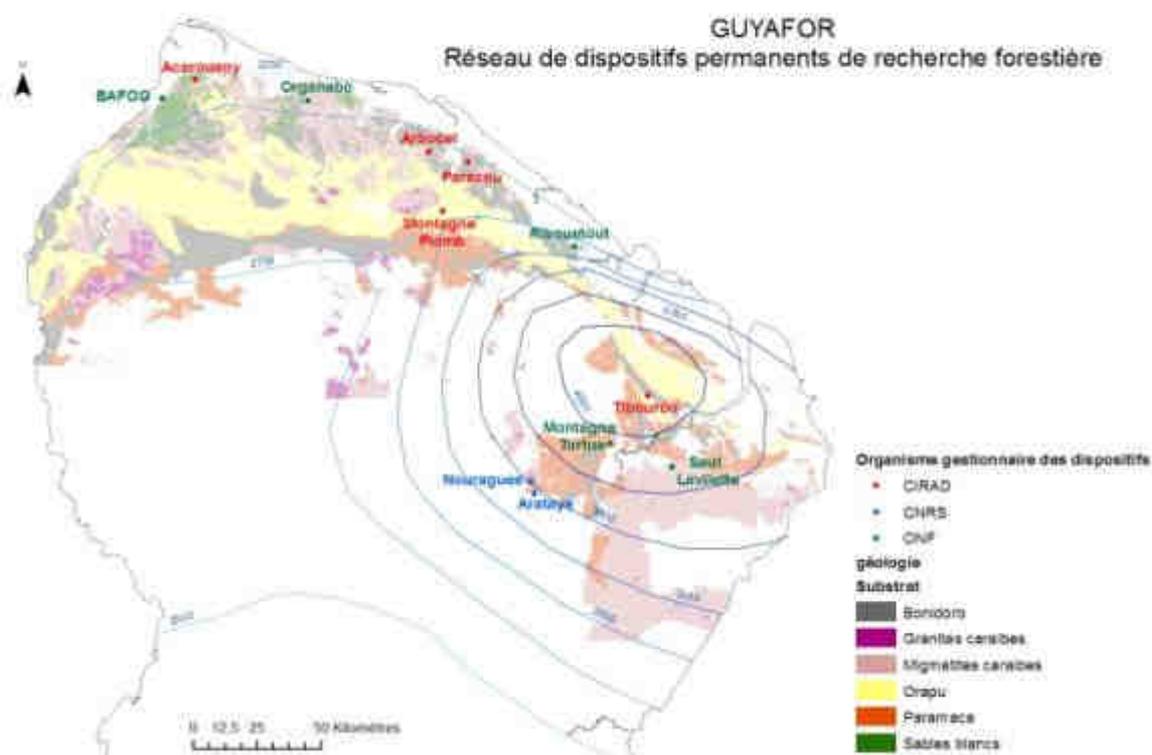


Figure 2 : GUYAFOR : Réseau des dispositifs permanents de recherche forestière de Guyane et diversité des substrats géologiques. Source : CIRAD

	Zone	Région	Sous-Région	Paysage	Nombre de plot	Surface par plot	Surface totale	Année d'inventaire
tibourou	B - La chaîne septentrionale ou synclinorium du nord	B3 - Région de l'est sédimentaire et volcanique	B3e - Sous-région des Monts Inéry, des Petites Montagnes Tortues et de la Montagne	Collines et plateaux complexes	1	6 ha	6 ha	2009
laussat	A - Les terres basses ou plaines cotières sédimentaire	A1 - Région côtière ouest de Saint Laurent - Mana	A 1a - Sous-région de Saint Laurent - Mana	Plaine côtière avec petits reliefs	1	4 ha	4 ha	2009
lavillette	C - Le massif central ou domaine granito-gneissique central	C3 - Région du massif centre-est	C31 - Sous-région de la crique Kapiri, de la Haute Kourouaïe, de la Gabaret et Saut Maripa	Plateaux hauts allongés	1	6 ha	6 ha	2008
acarouany	A - Les terres basses ou plaines cotières sédimentaire	A1 - Région côtière ouest de Saint Laurent - Mana	A1b - Sous-région des criques Saint Anne et Margot	Plaine côtière et flats	1	6 ha	6 ha	2010
plomb	B - La chaîne septentrionale ou synclinorium du nord	B2 - Région de l'ensemble détritique supérieur et du Paramacca de la bordure méridionale	B2e- Sous-région des Montagnes Plomb , Akoupa et de la Montagne St Michel	Hauts reliefs - montagne	1	6 ha	6 ha	2010
tortue	B - La chaîne septentrionale ou synclinorium du nord	B3 - Région de l'est sédimentaire et volcanique	B3d - Sous-région des Montagnes Cacao, Maripa, Tortue et Balenfois	Hauts reliefs - montagne	1	6 ha	6 ha	2007
Paracou	B - La chaîne septentrionale ou synclinorium du nord	B1 - Région de la série Armina et des granitoïdes	B1k - Sous région de la crique Malmanoury et Passoura	Plaine côtière avec petits reliefs	6	6,25 ha	37,5 ha	2008

Figure 3. Parcelles témoins des dispositifs GUYAFOR utilisées pour l'étude - Descriptif des différentes typologies paysagères pour chaque site - Année d'inventaire utilisée et choisie pour sa complétude – Source : Guitet et al (à paraître)

Protocole d'extraction des plots

Nous avons donc profité de ce réseau (cf. figure.4) pour tester la valeur prédictive du dispositif expérimental de Counami. Ainsi un certain nombre de plots de 0,3 hectares ont été extraits des parcelles témoins. Leur disposition au sein de la parcelle suivait deux grilles, dépendantes des surfaces allouables :

- Paracou (18 répétitions pour chacune des six parcelles témoins) : une bande extérieure d'au minimum 5 mètres de large n'a pas été prise en compte pour éviter des erreurs de bords ; les répétitions ne se superposent jamais pour éviter les biais de recouvrements partiels, 5 mètres entre chaque répétition ont été gardés.

- Les autres sites (24 ou 36 répétitions selon la surface de la parcelle) : la bande extérieure a également été rejetée ; cependant, par manque de place des superpositions ont été nécessaires selon un déplacement horizontal de 35 mètres, un déplacement vertical de 30 mètres, permettant cependant d'éviter des recouvrements du rond central.

Les plots de 0.3 ha ont été générés avec un script spécifique sur le logiciel RGUI. Le schéma ci-dessous (cf. figure.5) montre un cas particulier d'extraction des données sur la parcelle témoins 1 du site de Paracou, chaque couleur représentant une sous-parcelle (bleu = 'a', vert = 'b', rouge = 'c').

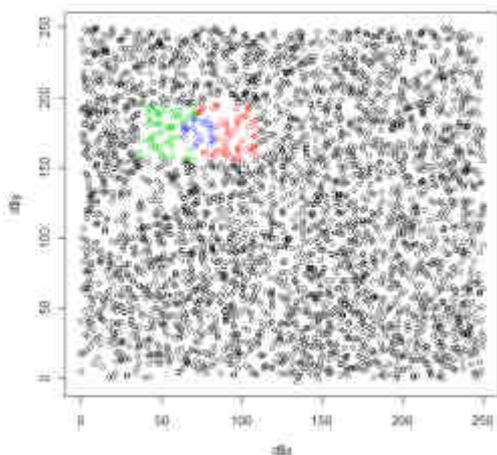


Figure 4 : Exemple d'une extraction de plot - R Gui

A chaque répétition, les calculs selon un inventaire en plein et un inventaire méthode de Counami ont donc été effectués. A chaque fois l'AGB et les indices de biodiversité ont été estimés (richesse spécifique, indice de

Shannon, nombre de Hill). Nous disposons ainsi de séries de données appariées, nous permettant de tester la double capacité prédictive de la méthode dans l'estimation de la biomasse et de la biodiversité forestière tropicale face à un inventaire en plein de même surface. Les moyennes ont été comparées, et les régressions linéaires ont permis de voir l'intensité de la corrélation (AIC et R² adj.).

Efficacité réelle du protocole de Counami sur la biomasse aérienne forestière

En vue de leur surface (6 parcelles de 6,25ha), les parcelles témoins de Paracou ont été retenues pour un volet d'étude plus approfondi. Les habitats, les reliefs, les conditions environnementales et la répartition des classes de diamètres entre Paracou et Counami sont très ressemblants, ce qui a également guidé notre choix. Les surfaces proposées par ce dispositif expérimental du CIRAD permettent donc de tester la méthode d'inventaire de Counami en réalisant un inventaire statistiquement suffisant, indemne de tous effets de bords, et de biais de superposition des plots lors des répétitions.

Une première étape a consisté à reproduire les tests précédemment réalisés sur les autres sites. Ainsi les moyennes ont été observées, et la force de corrélation entre les AGB des deux types d'inventaires a été testée. Une deuxième étape consistait à calculer le coefficient de variation (CV). Ainsi cette mesure de la dispersion relative permet de tester la stabilité de nos résultats selon la méthode d'inventaire :

$$\langle CV \rangle_{est} = \mu / \tau$$

L'étape trois s'appliquait à étudier le pourcentage de déviance (PD), considéré comme un résultat plus conservatif (Hall et al, 1998). Les 6 parcelles de Paracou ont été étudiées indépendamment. Pour chaque parcelle témoin, l'ensemble des combinaisons de plots pour des surfaces croissantes (multiples de 0,3ha) ont été réalisées. Le pourcentage de déviance a été calculé entre l'AGB moyen de chaque combinaison et l'AGB global de la parcelle. Les moyennes des PD pour chaque niveau surfacique constituent le résultat final à observer. La prise en compte de l'ensemble des combinaisons de plots pour

chaque niveau surfacique d'observation permet de prendre en compte les micro-variations environnementales, topographiques et de structure forestière au sein de la parcelle. Le seuil de 5 % de PD a été fixé comme seuil valable de bonne prédiction de l'AGB global des 6,25ha.

$$\langle PD \rangle_{est} = \frac{|AGB_{counami} - AGB_{parcelle\ témoin}|}{\max(AGB_{counami} - AGB_{parcelle\ témoin})}$$

L'étape finale estime le nombre n de parcelles nécessaires pour estimer l'AGB de chaque parcelle (soit 6,25 ha), et l'AGB des 6 parcelles (soit 37,5 ha), à travers une erreur d et à un taux d'erreur α , avec :

$$n = s^2 t_{[\alpha, n-1]}^2 / d^2$$

Où t est le t statistique de Student (établi pour 1.96, la valeur d'une distribution normale, pour se délier de la dépendance au nombre d'observation) et s^2 la variance de l'échantillon.

Résultats

Méthode d'inventaire de Counami vs inventaire en plein sur 0,3ha :

Le modèle d'inventaire type Counami a donc été répété sur 6 parcelles témoins, chacune représentative d'un habitat et/ou d'un modelé de paysage différent.

Les régressions linéaires (cf. figure.7) entre l'inventaire en plein et l'inventaire de type Counami présentent pour chaque site une corrélation forte, avec le meilleur AIC pour le site de 'Laussat' et les meilleurs coefficients de corrélation pour 'Tortue' (cf. figure.6).

Name	Rep	Pearson	R ²	R ² adj	AIC
tortue	36	0,97188	0,9446	0,9429	315
plomb	36	0,941124	0,8857	0,8824	330
laviette	36	0,932488	0,8695	0,8657	342
tibourou	36	0,89206	0,7958	0,7898	337
acarouany	36	0,951234	0,9048	0,902	326
laussat	24	0,8687341	0,7547	0,7435	231

Figure 6 : Résultats des régressions linéaires.

Une légère tendance de la méthode de Counami à surestimer dans les gros AGB est notable dans les 6 cas d'étude (droite de régression en vert).

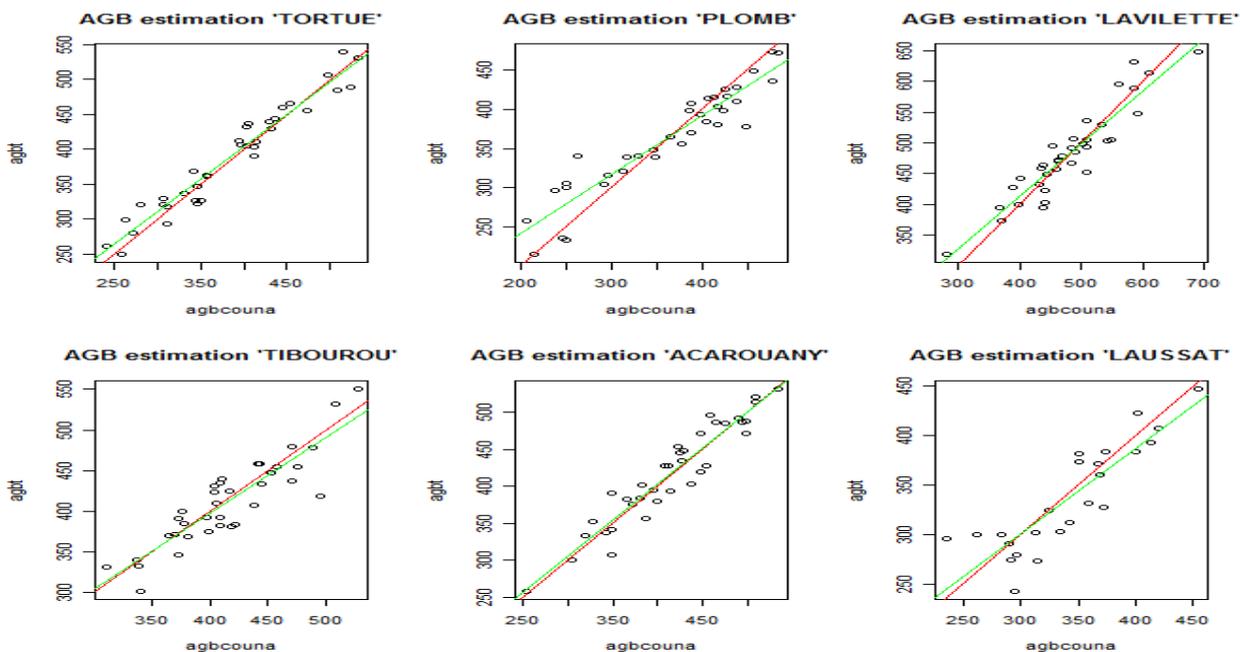


Figure 5 : Régressions linéaires pour les 6 parcelles témoins du réseau GUYAFOR sélectionnées pour présenter une parcelle témoin – valeur des AGB calculés selon la méthode Counami (en abscisse) et en plein (en ordonnée). En vert la courbe de régression et en rouge la fonction $y=x$.

L'inventaire type Counami mauvais estimateur des niveaux de biodiversité.

Toujours sur le même principe, l'on a comparé différents indices de biodiversité. L'objectif était le même, voir si une corrélation existe entre les deux méthodes d'inventaire, et ainsi tester la valeur de la méthode Counami dans le cadre de l'évaluation des niveaux de biodiversité d'un site.

Il s'est avéré que pour tous les indices (richesse spécifique, Shannon, nombre de Hill) aucune corrélation évidente n'est sortie. Pour exemple l'indice de richesse spécifique calculé sur l'ensemble des parcelles témoins de Paracou est présenté dans le graphique ci-après (cf. figure.8). Ainsi la focalisation de l'inventaire sur les gros diamètres, entraîne une sous évaluation voir une omission de certaines espèces, sans permettre néanmoins de trouver un facteur de correction précis.

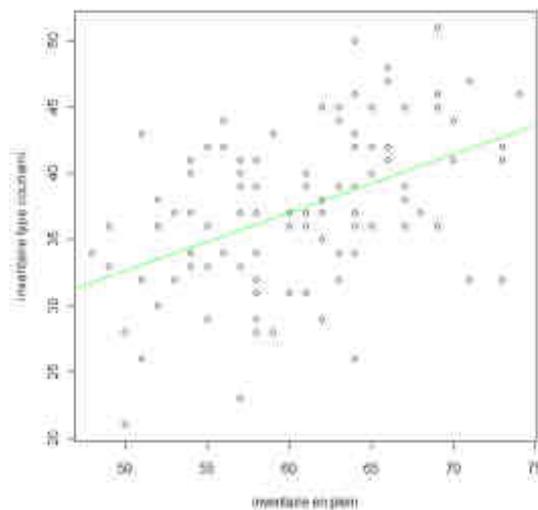


Figure 7 : Exemple de l'absence de corrélation entre les deux méthodes d'inventaire (Counami en ordonnée et en plein en abscisse) sur le calcul de la richesse spécifique

L'inventaire de type Counami un gain de temps considérable

Les temps nécessaires pour réaliser un inventaire de type Counami et un inventaire classique de 0.3 ha, ont été estimés. Pour ce faire, l'hypothèse que tous les arbres, indépendamment de leur DBH et de la présence de contre fort, prennent le même temps de mesure a été formulée. Ainsi le temps de réalisation d'un inventaire devient directement proportionnel au nombre d'arbre à mesurer. Il s'est

avéré qu'un inventaire de type Counami comptabilise trois fois moins d'arbres qu'un inventaire en plein, et donc pourrait économiser trois fois plus de temps (cf. figure.9).

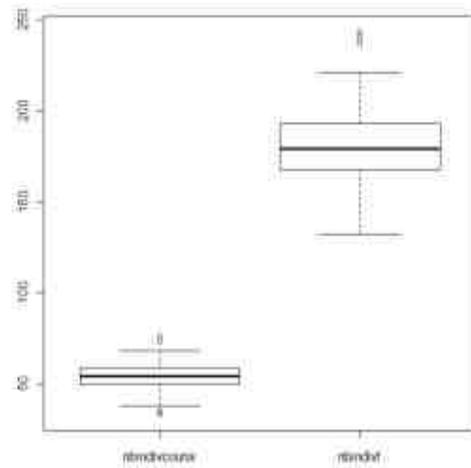


Figure 8 : Boxplot du nombre d'individus mesurés pour la méthode d'inventaire type Counami (à gauche) et en plein (à droite)

Analyse des CV sur le site de Paracou

Une régression linéaire spécifique à Paracou, selon le même travail que présenté précédemment, a été opérée (cf. figure.10). Les résultats, apportent les mêmes lots de conclusions avec une régression linéaire (ligne verte) suivant la bissectrice du repère orthonormé (ligne rouge).

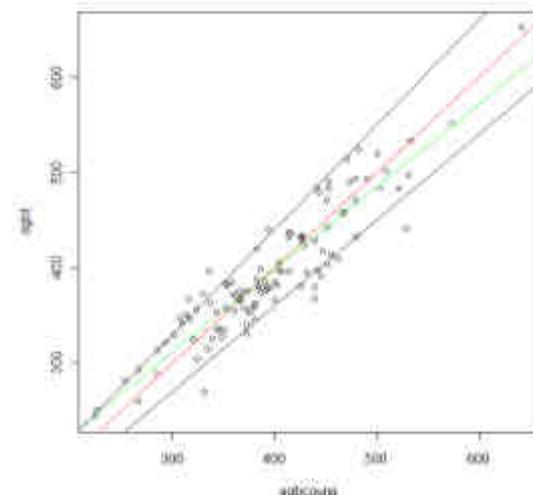


Figure 9 : Régression linéaire sur Paracou - AGB méthode Counami (en abscisse) et en plein (en ordonnée) – en vert la courbe de régression, en rouge la fonction $y=x$ et en noir les seuils de 10% d'écart à la moyenne espérée

Cette régression vient appuyer les résultats trouvés précédemment, avec cette fois ci des tirages de plots isolés et « indépendants ». L'ensemble des points se trouvent par ailleurs dans la limite des $\pm 10\%$ d'écart à la moyenne espérée, soit 87% des points à moins de 10% de variation de la valeur l'inventaire en plein. Par ailleurs, Paracou présentant de nombreuses similitudes de structure et d'environnement avec Counami, les résultats viennent conforter l'ensemble du dispositif ONF de Counami.

Les résultats des CV (cf. figure.11) de l'inventaire en plein (points rouges) et de l'inventaire type Counami (points bleues), montrent les mêmes tendances pour les deux dispositifs (les 6 parcelles témoins de Paracou confondues). Les valeurs des CV des deux méthodes tendent à se rejoindre après le seuil de 1.5 hectares, seuil avant lequel les données sont légèrement mieux organisées et avec une variance plus faible pour l'inventaire en plein. Cependant, sur un critère prenant en compte le nombre de répétitions de placettes de 0.3 hectares nécessaires pour franchir un CV de 10%, la barre est franchie au même moment, soit au passage de la troisième et quatrième répétition.

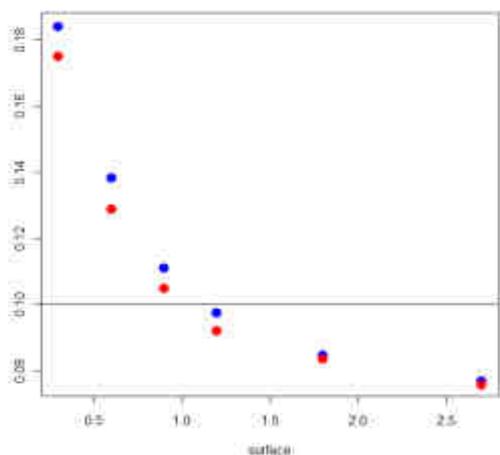


Figure 10 : CV de l'AGB en fonction de la surface d'inventaire pour les deux méthodes - en bleu méthode d'inventaire type Counami et en rouge méthode d'inventaire en plein

Analyse du PD sur le site de Paracou et valeur prédictive à plus grande échelle des placettes de Counami.

L'ensemble des résultats de cette partie sont synthétisés dans le tableau de la page suivante (cf. figure.13). Les pourcentages de déviance observés sur

Paracou donnent des résultats qui en termes de grandeur numérique et de tendance se ressemblent pour les deux méthodes d'inventaire. Cependant trois micro-situations sont observables (block gris et orange du tableau), on a ainsi : 2 parcelles où la méthode de Counami donne un PD significativement meilleur à celui de la méthode d'inventaire en plein, 2 parcelles où le PD est significativement moins bon, et 2 parcelles où les deux méthodes ont un PD sensiblement identique. Néanmoins la moyenne des PD sur les 6 parcelles, donc les PD sur l'ensemble du dispositif témoin de Paracou, apporte un résultat strictement identique.

Le taux de couverture par les plots représente 86,4% de la surface totale des placettes témoin de Paracou ($18 * 0.3 = 5,4$ ha sur 6,25 ha). L'observation du nombre d'individus par classes de diamètre de l'inventaire en plein (bloc bleu du tableau) et de l'inventaire type Counami (bloc violet du tableau) en comparaison avec le nombre d'individus des mêmes classes sur l'ensemble de chaque parcelle (bloc rose) permet d'affirmer que les structures sont très bien conservées. Néanmoins le taux de couverture en nombre total d'individus est très constant pour l'inventaire en plein (83-84%), et beaucoup plus variable pour l'inventaire type Counami (de 77% à 90%). Toutefois la valeur moyenne de ce taux sur les 6 parcelles est plus proche de la valeur espérée de 86,4% pour la méthode d'inventaire type Counami.

52% de l'AGB est représenté par la classe de diamètre supérieure à 40 cm de DBH (cf. figure.12). Les individus de la classe supérieure étant comptabilisés sur l'ensemble des 0,3ha pour les deux méthodes les résultats sont semblables. C'est donc dans les deux autres classes de diamètre que se jouent les micro-variations pour chaque parcelle témoin, et plus particulièrement sur la classe intermédiaire

parcelle	DBH40para	DBH40couna	DBH25para	DBH25couna
1	51%	51%	80%	79%
6	58%	58%	83%	87%
11	48%	49%	79%	77%
13	49%	49%	80%	79%
14	52%	53%	81%	79%
15	52%	51%	79%	75%
moyenne	52%	52%	80%	79%

Figure 11 : Part d'AGB prise par les différentes classes de DBH. A gauche supérieur à 40 cm et à droite supérieur à 25 cm.

	couna1	para1	couna6	para6	couna11	para11	couna13	para13	couna14	para14	couna15	para15	Moy couna	Moy para
PD à 0,3 ha	0,0885	0,1053	0,1007	0,1089	0,1100	0,0918	0,1116	0,1177	0,1310	0,1154	0,0882	0,0894	0,1050	0,1048
PD à 0,6 ha	0,0704	0,0779	0,0799	0,0831	0,0862	0,0698	0,0744	0,0829	0,0925	0,0811	0,0665	0,0671	0,0783	0,0770
PD à 0,9 ha	0,0605	0,0653	0,0682	0,0712	0,0770	0,0610	0,0617	0,0669	0,0772	0,0675	0,0564	0,0577	0,0668	0,0649
PD à 1,2 ha	0,0542	0,0579	0,0612	0,0642	0,0721	0,0562	0,0549	0,0611	0,0687	0,0600	0,0504	0,0524	0,0602	0,0586
PD à 1,5 ha	0,0499	0,0530	0,0566	0,0598	0,0690	0,0532	0,0502	0,0565	0,0632	0,0551	0,0463	0,0489	0,0559	0,0544
PD à 1,8 ha	0,0462	0,0490	0,0532	0,0559	0,0673	0,0515	0,0470	0,0527	0,0595	0,0520	0,0452	0,0480	0,0531	0,0515
PD para 0,3 ha - PD couna 0,3 ha	0,0168		0,0083		-0,0183		0,0061		-0,0156		0,0012		-0,0003	
PD para 1,8 ha - PD couna 1,8 ha	-0,0028		-0,0027		-0,0158		-0,0057		-0,0075		-0,0028		-0,0015	
Schéma de Courbe (bleu Counami et rouge inventaire en plein)														
Effet de la méthode Counami	+		+		-		=		-		=		=	
Sur les 6 placettes témoins de Paracou, inventaire complet sur l'ensemble des 6 * 6,25 ha														
nb individus DBH 7.5-25	2642	72%	2551	70%	2931	73%	2729	71%	2672	71%	3101	74%	16626	71%
nb individus DBH 25-40	710	19%	646	18%	747	19%	786	20%	724	19%	729	17%	4342	18%
nb indiv DBH > 40	321	9%	424	12%	346	9%	354	9%	373	10%	380	9%	2198	9%
nb indiv DBH > 60	64	2%	96	3%	70	2%	73	2%	62	2%	73	2%	438	2%
Total individus	3673		3717		4094		3942		3831		4283		23540	
AGB	381		382		383		384		385		386		383,5	
Sur la Grid de l'expérience soit 18 répétitions de 0,3 ha en plein par parcelles témoins de Paracou (inventaire de 5,4 ha/6,25ha)														
nb individus DBH 7.5-25	2222	72%	2182	71%	2454	73%	2324	71%	2254	71%	2624	74%	14060	72%
nb individus DBH 25-40	599	19%	543	18%	629	19%	667	20%	602	19%	604	17%	3644	19%
nb indiv DBH > 40	277	9%	342	11%	288	9%	294	9%	322	10%	318	9%	1841	9%
nb indiv DBH > 60	58	2%	76	2%	52	2%	59	2%	52	2%	59	2%	356	2%
Total individus	3098		3067		3371		3285		3178		3546		19545	
% individus de la parcelle	84%		83%		82%		83%		83%		83%		83%	
Agb	376,56		416,44		381,2		394,08		396,83		400,48		394,265	
Var	5350.263		7342.776		3012.746		4638.136		5147.408		3341.916			
Sur la grid de l'expérience soit 18 répétitions de 0,3 ha type Counami par parcelles témoins de Paracou (inventaire de 5,4 ha/6,25ha)														
nb individus DBH 7.5-25	2468	75%	2205	71%	2265	72%	2483	72%	2273	72%	2760	74%	14454	73%
nb individus DBH 25-40	549	17%	544	18%	614	19%	694	20%	579	18%	641	17%	3621	18%
nb indiv DBH > 40	277	8%	342	11%	288	9%	294	8%	322	10%	318	9%	1841	9%
nb indiv DBH > 60	58	2%	76	2%	52	2%	59	2%	52	2%	59	2%	356	2%
Total individus	3294		3091		3167		3471		3174		3719		19916	
Var	4882.543		7343.967		3799.36		4449.057		6634.439		4361.858			
% individus de la parcelle	90%		83%		77%		88%		83%		87%		85%	
Agb	376,23		421,44		373,17		401,03		393,81		409,76		395,91	
	91%		79%		74%		81%		84%		81%			

Figure 12. Tableau récapitulatif des Pourcentages de Déviance

Ainsi 2 fois sur 6 la méthode de Counami est légèrement meilleure, 2 fois sur 6 identique, et 2 fois sur 6 légèrement moins bonne. Les variations d'une parcelle à l'autre proviennent du positionnement des deux sous-parcelles 'a' et 'b' (deux premières classes de diamètre), qui peuvent se retrouver dans des cas de figure particulier tel qu'un chablis.

Le test de puissance par la loi de Student, a été réalisé pour les deux méthodes. Il a permis d'estimer le nombre de plots nécessaires pour évaluer l'AGB d'une parcelle de 6,25ha (moyenne des n des 6 parcelles témoins), et l'AGB global d'une forêt de 37,5ha (fusion des 6 parcelles témoins). Plusieurs seuils ont été testés, avec des écarts d de 20%, 15%, 10%, et 5%. A plus grande échelle la méthode de Counami semble gagner en précision.

		Nombre de plots				
		d	20%	15%	10%	5%
pour 1 parcelle de 6,25ha (moyenne des 6 parcelles)	Counami		2,46	4,37	9,84	
	Plein		1,85	3,3	7,42	
les 6 parcelles ensemble soit 37,5 ha	Counami		2,38	4,25	9,56	38
	Plein		3,1	5,52	12,42	49,68

Figure 13. Résultat du test de Student - nombre de placettes nécessaires avec une erreur d.

Discussion

La méthode d'inventaire de Counami arrive, pour l'AGB, à un niveau de précision proche des résultats d'un inventaire en plein sur la même surface. Il semblerait également que moins de répétitions soient nécessaires pour estimer l'AGB d'une parcelle plus grande. Elle constitue une méthode intéressante pour la biomasse aérienne forestière, qui plus est répétable à travers différents habitats du territoire.

Le gain en temps est un argument supplémentaire, qui lorsque l'objectif est d'estimer la biomasse d'un site, devrait pousser généralement à choisir des plots

focalisant leurs inventaires sur les gros diamètres plutôt qu'un inventaire en plein de même surface.

Néanmoins, l'hypothèse formulée pour estimer le gain en temps est relativement fautive, car ne prenant pas en compte qu'un gros arbre et/ou des contreforts consomment plus de temps en mesure qu'un petit arbre. Il n'empêche que le gain de temps est une certitude numérique.

Les arbres de plus de 30 cm de DBH peuvent représenter plus de 80% de l'AGB (Chave, 2001), ce qui valorise la logique de l'inventaire type Counami. Cependant la biomasse aérienne des forêts Amazoniennes est fortement liée à la densité moyenne des communautés d'arbres, à la densité d'individus par hectare, et le BA (Malhi & al, 2006, Saatchi & al 2007). Les paramètres de prédictions sont dans un ordre d'importance décroissant : le DBH, le WSG, la hauteur, et le type de forêt (Chave, 2004). Ainsi, l'ajout des WSG spécifiques et des hauteurs devrait être testé. La hauteur pourrait alors jouer positivement car ayant un meilleur effet sur la classe de diamètres élevés, et le WSG pourrait jouer négativement car lié aux faibles diamètres pouvant être porté par les espèces de sous-bois généralement à croissance lente.

Chave et al (2003) ont démontré que les très faibles diamètres (inférieurs à un DBH de 10 cm), ainsi que les palmiers et les lianes peuvent avoir un effet non négligeable dans l'AGB global d'une forêt. Ainsi le rond central de la méthode Counami pourrait prendre en compte ce type de relevés.

La méthode de Counami a été testée pour l'estimation de paramètres statiques. Ainsi au regard du travail fourni par Wagner (2010), il serait intéressant de tester cette méthode pour des variables temporellement dynamiques tel que la croissance, la mortalité et le recrutement, qui nécessitent généralement des plots de taille supérieure (Hall et al, 1998 ; Chave et al, 2003 ; Wagner et al 2010).

Selon Baralotto et al (à paraître) le 0.5 ha Gentry plot modifié est la meilleure méthode pour estimer l'AGB, et le 0.1 ha Gentry plot, serait le meilleur estimateur de la biodiversité. Cependant ce dispositif, au design particulier, est constitué de nombreuses répétitions de sous-placettes de petites tailles, elles-mêmes sous divisées en autres sous placettes de très petites tailles. Ainsi lors de la mise en œuvre d'un inventaire en forêt, de nombreuses erreurs par des effets de bord peuvent apparaître. De même la difficulté de mise en place, et le temps nécessaire pour l'inventaire représentatif d'une prospection partielle de 1 ha, peut orienter les choix vers des dispositifs plus simples et plus facilement répliquables. A contrario du Gentry au design tout en longueur, l'inventaire type Counami est lui centré sur une petite surface, ainsi plus enclin à des erreurs locales. Ces erreurs prennent leur sources dans des situations particulières de perturbation des structures forestières tels que les chablis, les agrégats, des micro-conditions extrêmes localisées... pouvant biaiser des estimations à plus grande échelle si le nombre de répétition n'est pas suffisant.

Sur les aspects biodiversité de la méthode de Counami, la couverture partielle des densités réelles, et le focus sur les diamètres supérieurs, rend la méthode difficilement utilisable pour estimer les niveaux de biodiversité d'un site. Effectivement certains arbres ont plus de facilités à atteindre les gros diamètres, et d'autres ont tendance à être des espèces de sous-bois, à croissance lente et faible diamètre. Ainsi certaines espèces auront de fortes chances d'être manquées, alors qu'elles sont présentes sur le terrain d'étude. Dans ce sens l'étude de Couteron et al (2003) sur les gradients floristiques de Counami expliqués par des variables environnementales est largement critiquable.

Environ 2 parcelles sont nécessaires pour estimer l'AGB d'une parcelle de 6,25 hectares avec un niveau de précision à 20%. Dans le dispositif d'inventaire du massif de Counami, les placettes sont représentative d'une zone de 400 * 500 mètres soit 20 hectares. Ainsi peut-on se questionner de la représentativité de chaque placette de sa zone de carroyage.

References

- Baraloto, C. Rabaud, S. Molto, Q. Blanc, L. Fortunel, C. Davila, N. Rios, M. Valderrama, E. 2011. Geographic and environmental determinants of above-ground biomass in contrasting Amazonian forests. *Global Ecology and Biogeography*.
- Baraloto, C. Molto, Q. Rabaud, S. Hérault, B. Valencia, R. Blanc, L. Fine, P.V.A. Thompson, J. Zimmerman, J. (à paraître). Estimating tree diversity and aboveground biomass across Neotropical forests.
- Bouix, T. Freycon, V. Bouvet, J. M. 2000. Données d'inventaire de la forêt de Counami. Rapport technique ONF.
- Chave, J. Condit, R. Lao, S. Caspersen, J.P. Foster, R.B. Hubbell, S.P. 2003. Spatial and temporal variation of biomass in a tropical forest: results from a large census plot in Panama. *Journal of Ecology*, 91, 240-252.
- Clark Db, Clark Da (2000) Landscape-scale variation in forest structure and biomass in a tropical rainforest. *Forest Ecology and Management*, 137, 185-198.
- Couteron, P. Pelissier, R. Mapaga, D. Molino J.F. Teillier, L. 2003. Drawing ecological insights from a management-oriented forest inventory in French Guiana. *Forest Ecology and Management*, 173, 89-108.
- El Alaoui, G. Sion, I. 2004. Synthèse bibliographique sur les dispositifs forestiers en Amérique tropicale, Université d'Antilles Guyane.
- Hall, P. Ashton, P. S. Condit, R. Manokaran, N. Hubbel, S. P. 1998. Signal and noise in sampling tropical forest structure and dynamics. *Forest biodiversity research, monitoring and modeling. Conceptual background and Old World case studies*. Pp. 63-77.
- HUBBELL, S.P. & FOSTER, R. B. - 1983- Diversity of canopy trees in a neotropical forest and implications for conservation. In SUTON S.L. *Tropical Rain*

Forest: Ecology and Management, Blackwell Scientific Publications, London, 25-41

Maggia, L. 1997. « Counami » : organisation de la diversité et flux de gènes ; changement d'échelle et aménagement forestier. Cirad-forêt, projet de recherche.

Maitre, H.F. Laurent, D. Coic, A. 1992. Aménagement et conservation des forêts denses en Amérique tropicale. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Etude FAO, Forêts n°101, VI – 146

Pain-Orceet, M. Résultats de l'inventaire dendrométrique et floristique du massif forestier de Counami : Rapport de synthèse. 2001. CIRAD-Forêt, Programme forêts naturelles.

Phillips, O. L., Vargas, P. N., Monteagudo, A. L., Cruz, A. P., Zans, M. E. C., Sanchez, W. G., Yli-Halla, M. & Rose, S. (2003a) Habitat association among Amazonian tree species: a landscape-scale approach. *Journal of Ecology*, 91, 757-775.

Phillips, O. L., Vasquez Martinez, R., Nunez Vargas, P., Lorenzo Monteagudo, A., Chuspe Zans, M. E., Galiano Sanchez, W., Pena Cruz, A., Timana, M., Yli-Halla, M. & Rose, S. (2003b) Efficient plot-based floristic assessment of tropical forests. *Journal of Tropical Ecology*, 19, 629-645.

Roggy, N. 1997. Audit de faisabilité technique scientifique et sociale du projet Counami. Silvotab – Guyane

Sabatier, D. Prévost, M.F. 1990. Quelques données sur la composition floristique et la diversité des peuplements forestiers de Guyane Française. *Revus Bois et Forêts des Tropiques*, n°219, spécial Guyane.

Ter Steege, H., Sabatier, D., Castellanos, H., Van Andel, T., Duivenvoorden, J., De Oliveira, A.A. *et al.* (2000) An analysis of the floristic composition and diver-

sity of Amazonian forests including those of the Guiana Shield. *Journal of Tropical Ecology*, 16, 801–828.

Ter Steege, H. Pitman, N. Sabatier, D. Castellanos, H. Van Der Hout, P. Daly, D.C. Silveira, M. Phillips, O. Vasquez, R. Van Andel, T. 2003. A spatial model of tree a-diversity and -density for the Amazon Region. *Biodivers. Conserv.* 12, 2255–2276.

Ter Steege, H. Pitman, N.C.A. Phillips, O.L. Chave, J. Sabatier, D. Duque, A. Molino, J.F. Prévost. M.F. Spichiger, R. Castellanos, H. von Hildebrand, P. Vasquez, R. 2006. Continental-scale patterns of canopy tree composition and function across Amazonia. *Nature*, 443, 444-447.

Tuomisto, H., Poulsen, A.D., Ruokolainen, K., Moran, R.C., Quintana, C., Celi, J. *et al.* (2003a) Linking floristic patterns with soil heterogeneity and satellite imagery in Ecuadorian Amazonia. *Ecological Applications*, 13, 352–371.

Valencia, R. Foster, R.B. Villa, G. Condit, R. Svenning, J.C. Hernández, C. Romoleroux, K. Losos, E. Magard, E. Balslev, H. 2004. Tree species distributions and local habitat variation in the Amazon: large forest plot in eastern Ecuador. *Journal of Ecology*, 92, 214–229.

Wagner, F. Rutishhauser, E. Blanc, L. Herault, B. 2010. Effects of Plot Size and Census Interval on Descriptor of Forest Structure and Dynamics. *Biotropica*, 9p.

Zeide, B. 1980. Plot Size Optimization. *Forest Sciences*, 26, 251-257

RT N°2 : ESI & SIWSI – PHENOLOGIE DES FORETS TROPICALES DE GUYANE A UNE MESO-ECHELLE A PARTIR DES IMAGES MODIS

Résumé :

Les études sur la phénologie des forêts tropicales humides sont relativement rares. Les contraintes techniques d'accès au terrain, les contraintes économiques si l'on opte pour des inventaires forestiers à grande échelle, et les contraintes logistiques, peuvent en être des raisons majeures. Le suivi de la phénologie par télédétection est en passe de devenir une alternative de choix. En ce sens, cette étude caractérise la dynamique temporelle annuelle du couvert forestier du massif ONF de Counami en Guyane Française. Des indices de végétation et des signaux satellites (extrait d'images MODIS) ont permis de produire deux indices pour ce suivi : EVI (« Enhanced Vegetation Index ») & SIWSI (« Shortwave Infrared Water Stress Index »).

Au regard d'un travail déjà fourni sur l'ensemble de la Guyane (Pennec, 2010), donc à une échelle régionale, cette étude porte sur la lecture de comportements à une méso-échelle, par une approche temporelle annuelle et une lecture spatialisée des réponses. Le principe de cette étude se base sur la reconstruction d'une mosaïque annuelle de données temporelles lissées par les moyennes de 5 années (2000-2005). Les données ont été extraites pour chaque parcelle d'inventaire quadrillant de manière régulière et dense les 12 400 hectares du dispositif de Counami.

L'observation du tracer moyen annuel de l'EVI sur Counami suit parfaitement la tendance et les valeurs de la moyenne régionale. Pour le SIWSI la tendance est également la même. Ces deux indices couplés permettent de retrouver assez facilement le type de formation végétale à l'échelle d'un massif forestier, au regard de la classification de Gond (2009) issue du traitement des images SPOT-5. Cependant les valeurs du SIWSI sont plus basses, témoignant des conditions d'hydromorphie très présentes sur le site de Counami. De même, le stress en saison sèche semble moins intense que la moyenne régionale, mais beaucoup plus homogène. La répartition spatiale des valeurs de l'EVI suit très étroitement le relief, un gradient topographique voir altitudinal est facilement percevable. Pour le SIWSI la répartition spatiale est beaucoup plus difficile à expliquer.

Abstract :

Studies on tropical rain forests phenology are relatively rare. Technical constraints of land access, economic constraints if large-scale forest inventory is opted, and logistical constraints, may be major reasons. Phenology monitoring with remote sensing is becoming a great option. In this sense, this study characterized the temporal dynamics of annual forest cover of Counami forest in French Guiana. Vegetation index and satellite signals (from MODIS) have produced two indexes permitting this monitoring: EVI ("Enhanced Vegetation Index") & SIWSI ("Shortwave Infrared Water Stress Index").

In relation to a work already provided on the whole forests of Guyana (Pennec, 2010), so on a regional scale, this study examines a meso-scale forest, approach time annual reading and spatial answers. The principle of this study is based on the reconstruction of a mosaic of annual time series data smoothed by a five years average (2000-2005). Data were extracted for each plot inventory of the regular and dense grid of the 12 400 hectares of Counami device.

The observation of EVI annual mean on Counami perfectly follows the trend and values of the regional average, as for SIWSI. These two coupled index can easily find the type of plant community on the forest meso-scale, under the classification of Gond (2009) from the processing of SPOT 5 images. However SIWSI values are lower, reflecting the hydromorphic conditions on the site of Counami. Similarly, stress in the dry season seems less intense than the regional average, but much more homogeneous. The spatial distribution of EVI values follows very closely the relief, a topographic and/or altitudinal gradient is easily observable. SIWSI for the spatial distribution is much more difficult to explain.

Introduction :

Des estimations précises des propriétés biochimiques de la canopée relèvent de nombreuses applications en télédétection et en écologie terrestre (Gao & Goetz, 1995). L'estimation de la teneur en eau de la végétation est importante pour évaluer les conditions hydriques en agriculture ou en foresterie par exemple (Gao, 1996 ; Gao & Goetz, 1995 ; Penuelas et al, 1997 ; Ustin & al, 2004a, 2004b & 1998 ; Zarco-Tejada et al, 2003), et/ou des utilisations destinées à évaluer des états de sécheresses (Penuelas & al, 1993), voir pour pousser vers l'analyse spatialisée des risques de feux (Chuvienco & al, 2004 ; Riano et al, 2005 ; Ustin et al, 1998).

La réflectance dans les proches infrarouges (NIR) et les courts infrarouges (SWIR) est largement influencée par l'eau et les matières sèches des feuilles (Gao, 1996 ; Jacquemond et al, 1996 ; Penuelas et al, 1997 ; Tucker, 1980), les pigments photosynthétiques n'absorbant que dans le visible et le début des infrarouges (Carter 1994 ; Miller et al, 1990 ; Ustin et al, 2004a, 2004b ; Zarco-Tejada et al, 2004, 2001). Ainsi la mesure du NIR-SWIR permet d'approcher une estimation quantitative de la valeur en eau de la végétation.

Plusieurs études insistent sur l'intérêt des images MODIS (« Moderate Resolution Imaging Spectrometer ») dans ce type d'observation (Zarco-Tejada & Ustin, 1998, 2003 ; Zarco-Tejada ; Justice, 1998). Les données MODIS MOD09A1 et MOD09Q1 (<http://modis.gsfc.nasa.gov>) donnent les réflectances calibrées des 7 bandes spectrales de 400 à 2500nm, sur des précisions du pixel de 250 ou 500 mètres. La bande 2 (centrée à 858.5 nm), la bande 5 (centrée à 1240 nm) et la bande 6 (centrée à 1640 nm) ont déjà été utilisées pour retrouver la teneur en eau (Fensholt & Sandholt, 2003 ; Gao, 1996 ; Xiao et al, 2005 ; Zarco-Tejada & al, 2003 ; Zarco-Tejada & Ustin, 2001). Gao (1996) a été le premier à proposer le NDWI (« Normalized Difference Water Index ») en utilisant les bandes 2 et 5 des images MODIS afin de retrouver l'eau liquide dans la végétation. Les bandes 2 et 6 elles ont permis de produire le SIWSI (« Shortwave Infrared Water Stress Index », Fensholt & Sandholt, 2003) et le LSWI (« Land Surface Water Index », Xiao et al, 2005) pour monitorer les changements

de teneur en eau de la végétation spatialement et temporellement. Cette combinaison est l'équivalent du NDII (« Normalised Difference Infrared Index », Hardsky et al, 1983) dans les utilisations des données de Landsat.

La télédétection par satellite à une résolution spatiale modérée offre des informations qui peuvent révéler des changements saisonniers dans la végétation. Beaucoup d'études en télédétection se sont concentrées sur le LAI et le PAR absorbés par la Canopée (Myeni et al, 2002). Le PAR est hautement corrélé avec le NDVI (« Normalized Difference Vegetation Index », Goward & Huemmrich, 1992), qui est calculé comme le ratio entre la bande rouge et les proches infrarouges. Le NDVI est ainsi largement utilisé pour estimer le LAI (Asrar et al, 1992 ; Sellers et al, 1992). Les forêts tropicales humides sempervirentes présentent généralement des valeurs très élevées du LAI, souvent non représentatives d'une réalité écologique puisque le PAR et le NDVI saturent. De plus, le NDVI varie saisonnièrement à l'échelle régionale en Amazonie principalement par les variations des conditions atmosphériques que provoquent la présence d'aérosols et de nuages (Kobayashi & Dye, 2005)

L'indice EVI (« Enhanced Vegetation Index ») est une version améliorée du NDVI, non sensible aux contaminations atmosphériques (Huete et al, 2002). Xiao et al (2005.c) ont étudié de manière aboutie les variations saisonnières de plusieurs forêts tropicales humides du centre de l'Amazonie, en utilisant les images du capteur VEGETATION de SPOT-4 et les capteurs MODIS du NASA-EOS Terra. L'EVI ne présentait pas de problèmes de saturation sur l'année, et un pic à la fin de la saison sèche se poursuivant au début de la saison humide a été corrélé avec les phases de chutes intenses de feuilles mortes et leur renouvellement. Ces résultats sont repris par Penneç (2010) sur la Guyane, qui associe directement ces dynamiques avec des relevés pluviométriques locaux. L'observation de ce pattern phénologique suggère un plus haut niveau de photosynthèse dans la saison sèche et correspond à la dynamique saisonnière des échanges nets de CO₂, qui absorbe le Carbone à la saison sèche et le relargue à la saison humide (Saleska et al, 2003).

Généralement considéré comme une masse verte homogène, la forêt tropicale Amazonienne est plutôt un

vaste continuum écologique de multiples habitats (Guitet et al pour la Guyane, à paraître) dépendants des conditions climatiques, en eau, de sol et de son histoire, et de l'impact humain. Gond (2009) a défini la carte des types de végétations de la Guyane Française à partir du capteur de SPOT-VEGETATION. Pennec et Gond (2010) ont utilisé ces typologies pour étudier indépendamment le comportement de l'EVI et du SIWSI sur les différents types de végétation. Des gradients Nord-Sud ont clairement été soulignés.

L'ensemble des études se focalisent généralement sur des approches régionales. Cette fois le niveau d'observation se pose sur une méso-échelle, celle d'un massif forestier. Le site ONF de Counami, d'environ 12 000 hectares, a été sélectionné pour tenter de décrire des comportements annuels spatialisés.

Matériel et méthodes :

Support de travail :

Les images proviennent des images MODIS fournies par les bases de données de la NASA (plateforme GloVis pour le téléchargement). Les années retenues sont de février 2000 à février 2005, période où l'on considère que l'exploitation forestière du massif de Counami est réduite et très localisée aux abords de la piste forestière. Effectivement, selon les données de l'ONF, il y aurait moins de 2% de surface exploitée, et moins de 1% de surface impactée jusqu'à fin 2004.

L'objectif visait à reconstruire une série temporelle de 5 ans afin de lisser ces indices sur chaque pixel de la zone. Le jeu de données provient donc du satellite MODIS-Terra. Ce satellite présente de nombreux avantages (Justice & al. 1998) : un bon niveau de calibration, des corrections radiométriques, atmosphériques et géométriques, des bandes spectrales étroites pour éviter les phénomènes d'absorption atmosphérique, un grand nombre de scènes, une large palette de bandes spectrales, une grande résolution temporelle, une résolution jusqu'à 250 mètre ; rendant ce type de données et d'outils intéressants pour les études en forêt tropicale.

Indice développés :

Le "Surface Reflectance 8-Day L3 Global 250 m" des produits MODIS (MOD09A1 & MOD09Q1) a été utilisé pour calculer le SIWSI, cet indice étant directement corrélé au niveau d'hydratation du couvert végétal (Gond & al, 2009 ; Pennec al. 2011). Chaque scène, environ 4 par mois, intègre les surfaces de réflectance pour les bandes 1 à 7 (rouge, infra-rouge, bleu, vert, et 3 bandes pour les bas infra-rouge). Les bandes 2 [841–876 nm] (sur MOD09A1 à 500 mètres de résolution) et 6 [1628–1652 nm] (sur MOD09Q1 à 250 mètres de résolution) ont été utilisées pour le calcul du SIWSI où NIR est le proche infrarouge et SWIR les faibles infrarouges :

$$SIWSI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

Le "Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250 m" des produits MODIS (MOD13Q1) a été utilisé pour récolter l'indice EVI. Pour chaque scène, environ 2 par mois, le proche infrarouge, la bande rouge et la bande bleue ont été utilisés pour la production de l'indice :

$$EVI = \frac{2.5(NIR - R)}{NIR + 6R - 7.5B + 1}$$

L'indice EVI est utilisé pour sa représentativité de l'activité chlorophyllienne d'un couvert forestier (Pennec & al. 2011). Comme pour le « Normalized Difference Vegetation Index » (NDVI), qui sature pour les hauts niveaux d'activité chlorophyllienne, l'EVI est utilisé pour suivre le niveau d'activité métabolique du couvert forestier. L'EVI présente l'avantage sur le NDVI de pouvoir suivre les zones tropicales aux canopées denses, et de réduire les effets atmosphériques. Chaque produit des 8 et 16 jours s'appuie sur le minimum de la bande de réflectance bleue, qui réduit les biais atmosphériques. Cet indice n'étant pas sensible aux nuages aucun masque n'est à produire.

Extraction des canaux et géo-référencement :

Le site de la plateforme Glovis (pour « Global Vision »), a été l'un des moyens internet sélectionnés pour récupérer les données (Terra ou Aqua). Les scènes sont récupérées au format .hdf, un format complexe tel un empilement d'assiettes où chacune représente une bande ou un indice.

Les projections sont naturellement dans le système sinusoïdal. C'est le mode de prise de vue en réel du satellite lors de ses bandes de passage sur la forme ronde de la terre retranscrite sur un planisphère. De ce fait l'outil MRT-Tools (un outil développé par la Nasa) permettant d'accéder aux canaux désirés pour en extraire une image raster au format .GeoTif, et permettant à la fois de changer de projection, a été utilisé.

Ainsi l'EVI (sur MOD13Q1), la bandes 2 (MOD09Q1) et 6 (MOD09A1) ont été extraits et transformés en raster selon la projection UTM (WSG1987 - 21N) correspondant au parallèle de la scène et du plateau des Guyanes.

Correction des canaux :

L'on serait tenté d'étudier ces indices et leurs évolutions au fil du temps, pour suivre la phénologie saisonnière en fonction d'un hypothétique changement climatique par exemple. Cette approche reste très limitée qualitativement, car même quand des images composites sont utilisées pour réduire les effets atmosphériques il est clair que des pixels erronés existent toujours. Ainsi, un processus d'élimination ou d'atténuation de ces erreurs est indispensable.

Pour le MOD13Q1 et l'EVI, une moyenne sur 5 ans des données bimensuelles est suffisante pour atténuer les effets des derniers artefacts. Cette méthode n'est pas suffisante pour le SIWSI. Le NIR et le SWIR étant sensible à l'eau, une pré-étape permettant de faire un masque des nuages et des artefacts atmosphériques est nécessaire. Un filtre par seuil sur les 7 bandes a été appliqué :

- bande 01 : seuil de 700
- bande 02 : seuil de 3700
- bande 03 : seuil de 600
- bande 04 : seuil de 800
- bande 05 : seuil de 3800
- bande 06 : seuil de 2200
- bande 07 : seuil de 1000

Ainsi les pixels subsistants aux 7 seuils ont de faibles probabilités d'être affectés par un nuage ou un artefact atmosphérique. C'est ensuite qu'un lissage tempo-

ral sur 5 ans a été réalisé, aboutissant à une synthèse correspondant à un 'patchwork' sur 5 années.

Dynamique temporelle

Les tendances sur l'année des deux indices ont été comparées qualitativement aux résultats trouvés dans l'étude sur l'ensemble de la Guyane. Chaque date constitue une donnée, sauf chez le SIWSI où parfois deux dates proches ont du être fusionnées pour acquérir suffisamment de poids. C'est notamment le cas au mois de février, où en pleine saison des pluies on se retrouve avec un patchwork beaucoup trop éparse pour être interprétable d'une réelle tendance de la zone.

La répartition spatiale sur Counami des valeurs des deux indices a été analysée, afin de voir si des gradients étaient percevables sous forme d'aggrégations régionalisées.

Résultats :

Les cinétiques annuelles des indices EVI et SIWSI ont été établies sur Counami. Suffisamment de données ont pu être récoltées sur ce site de 12 000 hectares pour des statistiques représentatives. Les patterns des séries temporelles sont restés relativement stables entre chaque année surtout pour l'EVI.

L'indice EVI sur Counami suit scrupuleusement les mêmes tendances que les valeurs régional de Pennec et Gond (2010). Le moindre changement de pente, même sur un intervalle de temps proche, se superpose. Si l'on regarde l'aspect quantitatif, les valeurs sont représentatives de la classe « High forest with regular Canopy » issue de la classification produite par les images de VEGETATION-SPOT (Gond, 2009).

L'indice SIWSI suit également la tendance régionale. Cependant les valeurs sont beaucoup plus basses que n'importe lequel des 5 types forestiers étudiés par Pennec et Gond (2010). Néanmoins, la tendance générale ressemble également à la classe « High forest with regular canopy ». A la fin de la saison des pluies les micro-variations intra-mensuelles sont de beaucoup plus grande amplitude que l'observation régionale.

moyennes semi-mensuelles et mensuelles EVI 2000-2005

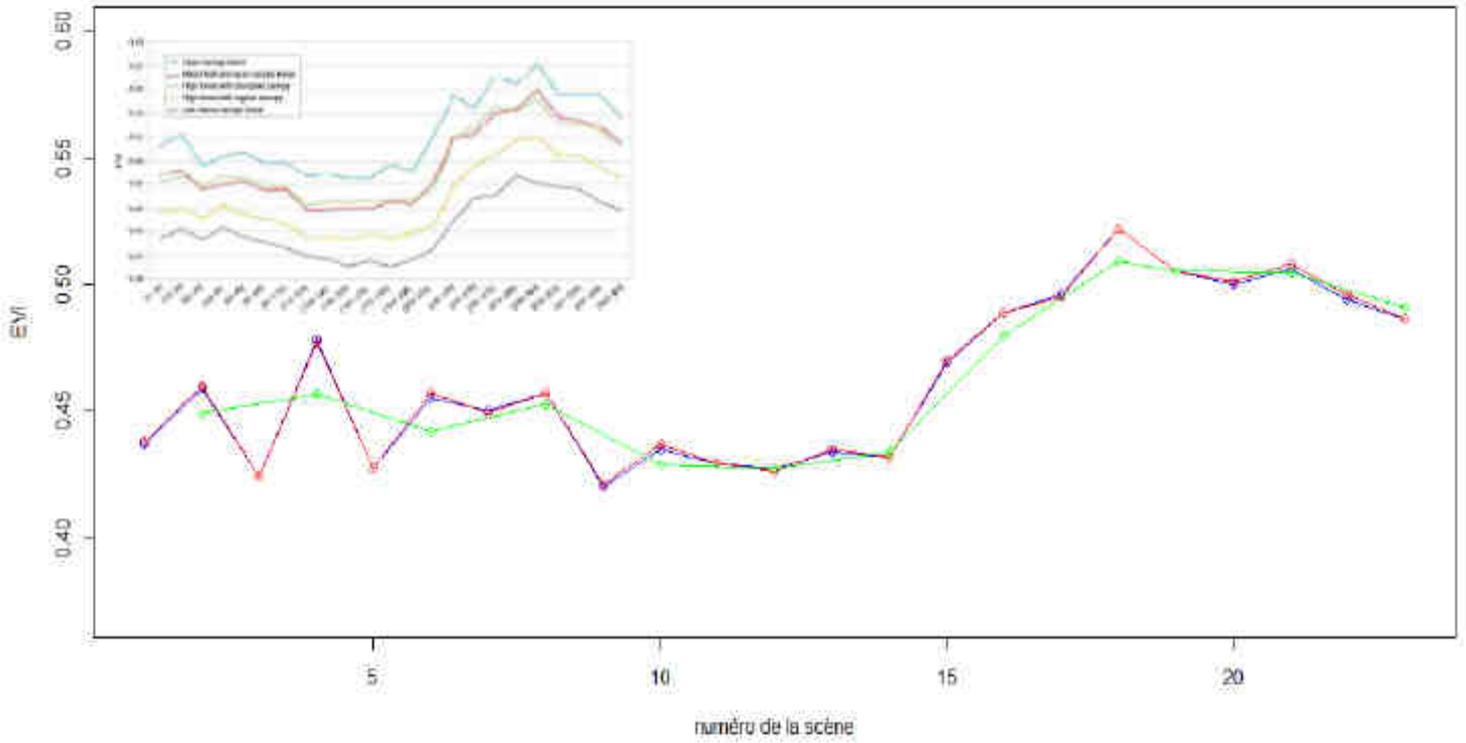


Figure 1 : Indice EVI calculé sur Counami en Guyane Française à partir des images MODIS (grand graphique) – valeur pour la Guyane (graphique d’angle) En rouge la valeur par scène, et en vert la moyenne mensuelle

moyennes par semaines et mensuelles SIWSI 2000-2005

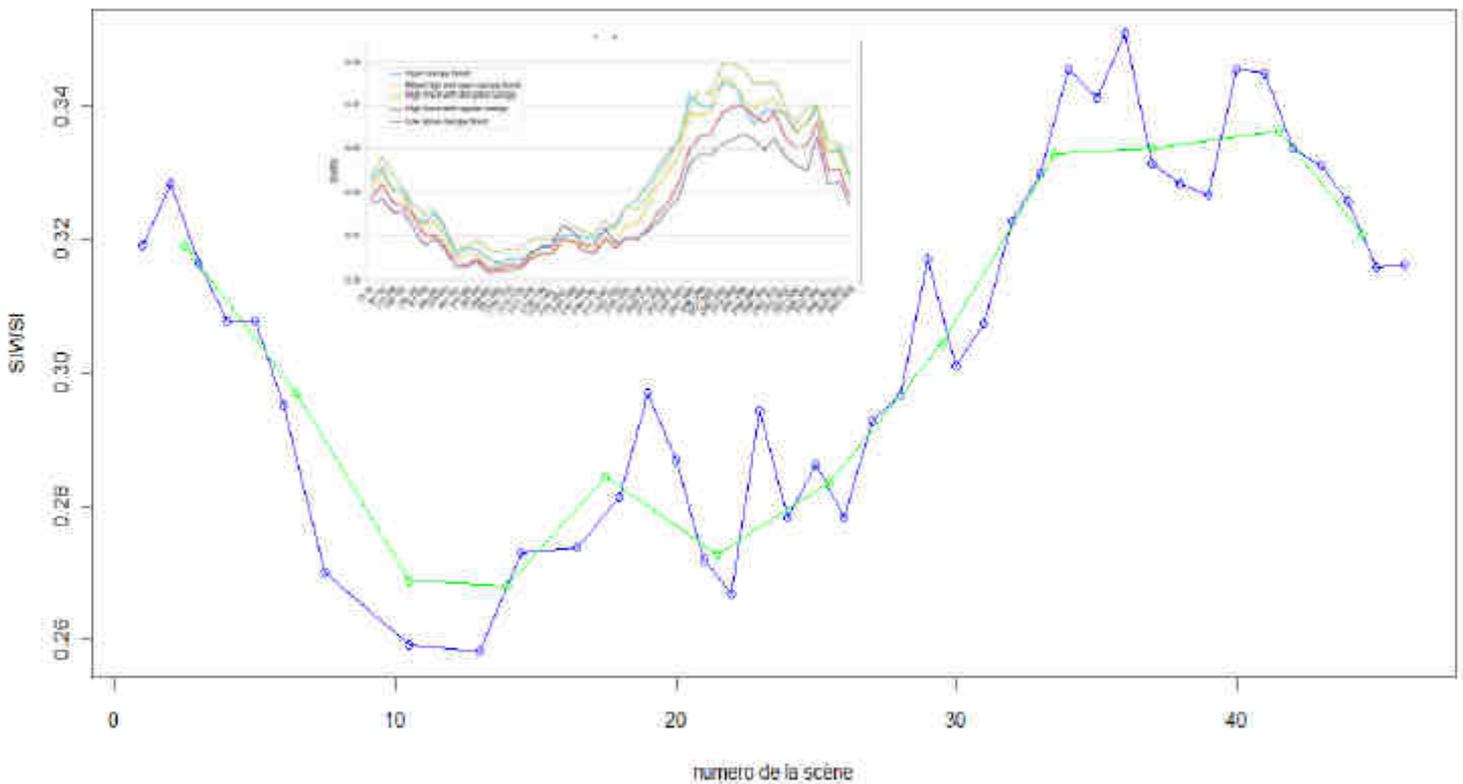


Figure 2 : Indice SIWSI calculé sur Counami en Guyane Française à partir des images MODIS (grand graphique) – valeur pour la Guyane (graphique d’angle) En bleu la valeur par scène et en vert la moyenne mensuelle

Seul l'EVI semble suivre un gradient spatialisé directement visible. Il semblerait qu'à une échelle locale un gradient altitudinal puisse réguler l'activité photosynthétique. Ainsi le r de Pearson entre l'altitude de la placette et la moyenne annuelle est de $r = 0.49$

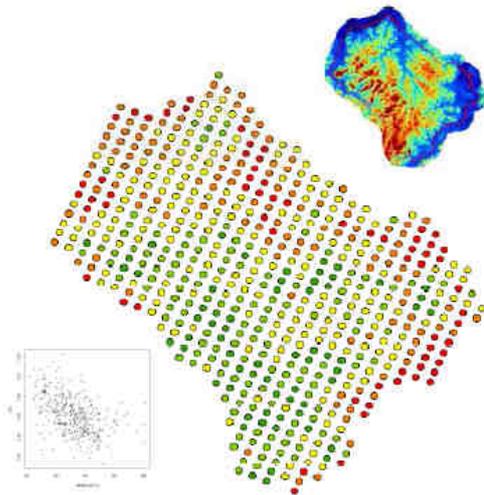


Figure 3 : EVI des placettes de Counami (valeur croissante du vert vers le rouge) - MNT corrigé en haut - Hauteur = f(EVI) en bas.

Discussion :

Gond et Pennec (2010) ont démontré que le comportement de la forêt Guyanaise était adapté aux conditions environnementales et notamment climatiques, à travers un gradient Nord/Sud. Avec le même outil à une échelle plus petite, nous appuyons le fait que l'environnement régit le comportement de la forêt mais cette fois c'est la topographie qui est mise en avant.

Les patterns phénologiques mis en exergue par ces études suggèrent que la canopée des forêts humides de Guyane produisent leurs nouvelles feuilles pour maximiser l'assimilation photosynthétique à la période où la couverture nuageuse est minimale et la photopériode maximale, soit pendant la saison sèche. Des résultats similaires ont été apportés au Brésil (Huete et al. 2006).

Une baisse de l'activité chlorophyllienne est observée du premier trimestre à la fin de la saison humide. Elle peut être expliquée par la sénescence massive de feuilles à cette période, et le manque de lumière. Le processus de maturation des feuilles atteint son maximum quand la saison des pluies est bien établie.

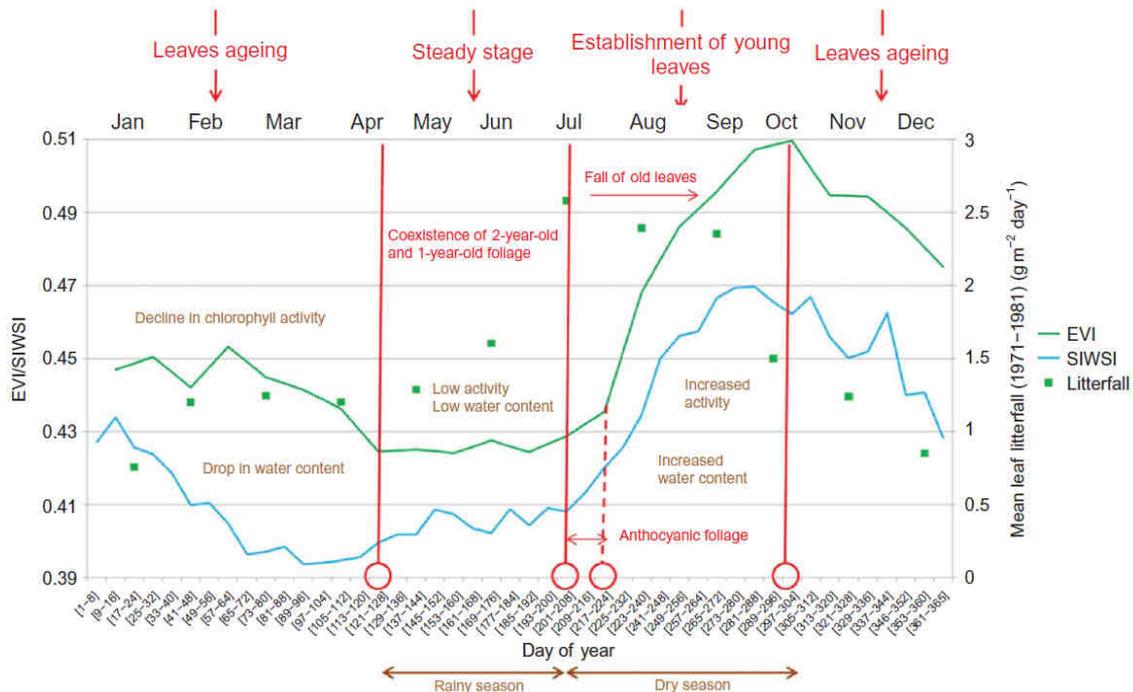


Figure 4 : Phénologie des forêts hautes avec une canopée régulière (EVI et SIWSI) et stade de production et de chute des feuilles (Sabatier et Puig, 1986)

Le pic de chute de litière est atteint à la fin de la saison humide et au début de la saison sèche, vers le mois de Juin. La remontée de l'indice EVI surgit juste après ce pic, au début de la saison sèche, au mois d'août. La remontée du SIWSI s'opère plus tôt, à la fin de la saison des pluies, vers mi juin. Ces phénomènes sont dûs à la chute des vieilles feuilles, et l'apparition des jeunes feuilles. Le laps de temps entre les deux remontées de valeurs des deux indices peut être expliqué par le fait que le jeune feuillage, dans ces jeunes stades, est souvent rouge et violet car chargé en anthocyane, présente un plagiotropisme faible, et sont chargées en eau, manquant ainsi d'intensité en activité chlorophyllienne.

L'EVI atteint son maximum au milieu de la saison sèche, à la fin du mois d'Octobre. A partir du début du mois de Novembre l'activité photosynthétique et la teneur en eau décroissent.

Une étape avec un faible niveau de photosynthèse coïncide avec le début de la saison humide et à une adaptation au manque de lumière. Ainsi, le feuillage devient de moins en moins actif et la teneur en eau décroît semaine après semaine. Les deux courbes décroissent jusqu'à mi-février et le début de la pleine saison humide.

Les 5 classes forestières présentaient des cinétiques annuelles similaires, mais avec certaines particularités de décalages de dates dans les stades de développement (Pennec et al, 2010). Ceci peut résulter en partie d'une question de disponibilité en lumière à l'échelle régionale, associée à l'impact de la ZIC (Zone Intertropicale de Convergence). Dans le même sens ce gradient Nord-Sud de comportement phénologique est à relier avec les compositions floristiques des 5 classes. Dans la production de la carte de végétation à partir de VEGETATION-SPOT (Gond et al, 2009) il y a une augmentation des espèces héliophylles à croissance rapide de la classe « low dense canopy forest » à la classe « open canopy forest ». De la même sorte Duputié et al. (2009) a poussé une étude sur *Manihot esculenta* ssp. *flabellifolia* en Guyane Française, démontrant que les populations de la côte sont génétiquement et phénologiquement différenciées avec les populations du Sud.

En ce sens nous apportons un autre point de différenciation. Notre EVI sur Counami est très fortement corrélé à la topographie. Les différentes classes topographiques présentent des cinétiques indiennes dans la tendance annuelle. Mais des décalages dans les dates de début de certains stades de développement sont à souligner. Ainsi les bas-fonds retardent le début de la saison sèche, et pour les reliefs l'intensité du pic est plus importante. Cela peut s'expliquer par les différences de dynamique entre les forêts de bas-fonds/pentes/plateaux. Ainsi, plus on va vers les bas-fonds, plus l'occurrence de chablis se fait présente. Les forêts y sont moins hautes, moins larges, avec un volume sur pied plus faible, mais un taux de croissance plus élevé (Ferry et al, 2009). Ce taux de croissance peut avoir deux explications, un cortège d'héliophylles plus important, et une possible fertilité accrue (Ferry et al. 2009). Ainsi dans les bas-fonds, l'activité photosynthétique est élevée, les caractéristiques de drainage de ces sols entraînent des capacités en eau et de rétention plus importantes et plus étalées dans la saison sèche. Ainsi localement l'EVI augmente vers les bas-fonds, et le SIWSI y subit la saison sèche plus tardivement. Ces différences sont principalement régies par des questions de drainage et de capacité de rétention en eau des sols, qui se différencient sur Counami selon un gradient altitudinal et topographique (Freycon, 2001 ; Ferry, 2009).

Ainsi la géomorphologie régionale en lien avec un gradient topographique Nord-Sud de la Guyane peut également concourir à expliquer ces patterns légèrement différenciés démontrés par Pennec et Gond (2010), le Sud ayant des reliefs beaucoup plus importants que le Nord, mais une dynamique totalement différente.

En Guyane Française, la forêt humide varie spatialement par la structure forestière, la composition et le comportement phénologique en lien avec des conditions environnementales, climatiques, pédo-géologiques et topographiques qui diffèrent. Ainsi la typologie forestière, le comportement phénologique et les positions topographiques devraient être pris en compte dans la balance Carbone. Chaque paysage forestier associé avec un comportement phénologique particulier devraient permettre de redéfinir les modèles de séquestration.

Références :

- G. Asrar, R.B. Myneni and B.J. Choudhury, Spatial heterogeneity in vegetation canopies and remote-sensing of absorbed photosynthetically active radiation — A modeling study, *Remote Sensing of Environment* 41 (1992), pp. 85–103.
- Carter, G. A. (1994). Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 697–704.
- Chuvieco, E., Cocero, D., Riaño, D., Martín, P., Martínez-Vega, J., de la Riva, J., et al. (2004). Combining NDVI and Surface Temperature for the estimation of live fuels moisture content in forest fire danger rating. *Remote Sensing of Environment*, 92(3), 322–331.
- Gao, B. -C. (1996). NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266.
- Gao, B. -C., & Goetz, A. F. H. (1995). Retrieval of equivalent water thickness and information related to biochemical components of vegetation canopies from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, 52(3), 155–162.
- Fensholt, R., & Sandholt, I. (2003). Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near-and shortwave infrared data. *Remote Sensing of Environment*, 87(1), 111–121.
- Ferry, B., Morneau, F., Bontemps, J.-D., Blanc, L. and Freycon, V. (2010), Higher treefall rates on slopes and waterlogged soils result in lower stand biomass and productivity in a tropical rain forest. *Journal of Ecology*, 98: 106–116. doi: 10.1111/j.1365-2745.2009.01604.x
- Goward and Huemmrich, 1992 S.N. Goward and K.F. Huemmrich, Vegetation canopy PAR absorbance and the Normalized Difference Vegetation Index — An assessment using the SAIL model, *Remote Sensing of Environment* 39 (1992), pp. 119–140.
- Hardisky, M. A., Lemas, V., & Smart, R.M. (1983). The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral reflectance of *Spartina alternifolia* canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49, 77–83.
- Huete et al., 2002 A. Huete, K. Didan, T. Miura, E.P. Rodriguez, X. Gao and L.G. Ferreira, Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, *Remote Sensing of Environment* 83 (2002), pp. 195–213.
- Huete, A.R., Didan, K., Shimabukuro, Y.E., Ratana, P., Saleska, S.R., Hutya, L.R., Yang, W., Nemani, R.R. and Myeni, R., 2006. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophysical Research Letters*, 33, L06405, doi:10.1029/2005GL025538.
- Jacquemoud, S., Ustin, S. L., Verdebout, J., Schmuck, G., et al. (1996). Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. *Remote Sensing of Environment*, 56(3), 194–202.
- Justice, C.O., Vermote, E. and Townshend, J.R.G., 1998, The MODIS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, pp. 1228–1249.
- Kobayashi and dye, 2005 H. Kobayashi and D. dye, Atmospheric conditions for monitoring the long-term vegetation dynamics in the Amazon using normalized difference vegetation index, *Remote Sensing of Environment* 97 (2005), pp. 519–525.
- Miller, J. R., Hare, E. W., & Wu, J. (1990). Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance: An inverted-Gaussian model. *International Journal of Remote Sensing*, 11, 1755–1773.
- Myneni et al., 2002 R.B. Myneni, S. Hoffman, Y. Knyazikhin, J.L. Privette, J. Glassy and Y. Tian et al., Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data, *Remote Sensing of Environment* 83 (2002), pp. 214–231.
- Peñuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L., & Savé, R. (1993). The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1887–1905.
- Peñuelas, J., Piñol, J., Ogaya, R., & Filella, I. (1997). Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing*, 18, 2869–2875.
- Riaño, D., Vaughan, P., Zarco-Tejada, E., & Ustin, P. J. (2005). Estimation of fuel moisture content by inversion of radiative transfer models to simulate equivalent water thickness and dry matter content. Analysis at leaf and canopy level. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43, 819–826.

- Miller, J. R., Hare, E. W., & Wu, J. (1990). Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance: An inverted-Gaussian model. *International Journal of Remote Sensing*, 11, 1755–1773.
- Peñuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L., & Savé, R. (1993). The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1887–1905.
- Peñuelas, J., Piñol, J., Ogaya, R., & Filella, I. (1997). Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing*, 18, 2869–2875.
- Riaño, D., Vaughan, P., Zarco-Tejada, E., & Ustin, P. J. (2005). Estimation of fuel moisture content by inversion of radiative transfer models to simulate equivalent water thickness and dry matter content. *Analysis at leaf and canopy level. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43, 819–826.
- Sabatier, D. and Puig, H., 1986, Phénologie et saisonnalité de la floraison et de la fructification en forêt dense guyanaise. In *Vertébrés et forêts tropicales humides d’Afrique et d’Amérique, Mémoires du MNHN*, A/132: 173–184 (Paris: Muséum National d’Histoire Naturelle).
- Saleska et al., 2003 S.R. Saleska, S.D. Miller, D.M. Matross, M.L. Goulden, S.C. Wofsy and H.R. da Rocha et al., Carbon in amazon forests: Unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses, *Science* 302 (2003), pp. 1554–1557.
- Sellers et al., 1992 P.J. Sellers, J.A. Berry, G.J. Collatz, C.B. Field and F.G. Hall, Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration: 3. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme, *Remote Sensing of Environment* 42 (1992), pp. 187–216.
- Ustin, S. L., Darling, D., Kefauver, S., Greenberg, J., Cheng, Y. -B., & Whiting, M. L. (2004a). Remotely sensed estimates of crop water demand. S.P.I.E. the international symposium on optical science and technology. 49th annual meeting, Denver, CO, 2–6 August.
- Ustin, S. L., Jacquemoud, S., Zarco-Tejada, P. J., and Asner, G. (2004b). *Remote Sensing of Environmental Processes, State of the Science and New Directions*. in *Manual of Remote Sensing Vol. 4. Remote Sensing for Natural Resource Management and Environmental Monitoring*. ASPRS. JohnWiley and Sons, New York 768p. +cd. (S.L. Ustin, vol. Ed.). ASPRS. John Wiley and Sons, New York, pages 679-730.
- Ustin, S. L., Roberts, D. A., Jacquemoud, S., Pinzón, J., Gardner, M., Scheer, G., et al. (1998). Estimating canopy water content of chaparral shrubs using optical methods. *Remote Sensing of Environment*, 65(3),
- Cheng, Y-B., Zarco-Tejada, P., Riano, D., Rueda, C., Ustin, S. (2006). Estimating vegetation water content with hyperspectral data for different canopy scenarios: Relationships between AVIRIS and MODIS indexes. *Remote sensing of environment*, 105, 354-366.
- Xiao, X., Boles, S., Liu, J., et al. (2005). Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment*, 95(4), 480–492.
- Xiao et al., 2005c X.M. Xiao, Q.Y. Zhang, S. Saleska, L. Hutrya, P. De Camargo and S. Wofsy et al., Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest, *Remote Sensing of Environment* 94 (2005), pp. 105–122.
- Zarco-Tejada, P. J., Miller, J. R., Morales, A., Berjón, A., & Agüera, J. (2004). Hyperspectral indices and model simulation for chlorophyll estimation in open-canopy tree crops. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 463–476.
- Zarco-Tejada, P. J., Miller, J. R., Noland, T. L., Mohammed, G. H., & Sampson, P. H. (2001). Scaling-up and model inversion methods with narrow-band optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(7), 1491–1507.
- Zarco-Tejada, P. J., Rueda, C. A., & Ustin, S. L. (2003). Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. *Remote Sensing of Environment*, 85(1), 109–124.
- Zarco-Tejada, P. J., & Ustin, S. L. (2001). Modeling Canopy Water Content for Carbon Estimates from MODIS data at Land EOS Validation Sites. IGARRS Meeting, Sydney, Australia, July.

RT N°3 : HAND

« HEIGHT ABOVE NEAREST DRAINAGE »

Introduction :

Renno & al (2008) ont développé un nouvel indice appelé HAND, pour « Height Above Nearest Drainage », comme nouveau descripteur des forêts Néotropicales. Cet indice a été développé à partir des données du « Shuttle Radar Topographic Mission » de la NASA (SRTM). Ils ont testé l'indice HAND comme un descripteur de l'eau du sol, de la topographie et de jeux de données de végétation du centre de l'Amazonie. Cette indice a été utilisé pour réaliser des typologies de stations et a ainsi révélé une forte corrélation avec les conditions hydriques du sol, comme les classes de profondeur de la nappe d'eau, et la topographie. Ces corrélations obéissent au principe physique du potentiel de drainage des sols, ou la distance verticale relative au drainage, qui peut être ainsi révélé à distance par satellite.

Avant de pouvoir définir l'indice HAND ou un quelconque potentiel gravitationnel entre un point et sa crique de drainage la plus proche dans le bassin versant, il est nécessaire de développer plusieurs outils, s'imbriquant en étapes chronologiques. L'un d'entre eux, et le principal, est le réseau hydrographique, dont la précision conditionne la définition des bassins versants et donc des indices.

Les algorithmes qui définissent les sens d'écoulements constituent une étape capitale des analyses hydrologiques par leurs modalités de calcul. Il y a plusieurs manières d'appréhender ces calculs. Deux grands types de méthodes sont disponibles dans la littérature. Une première famille de méthodes se réfère aux écoulements d'eau en mouvement entre les centres de deux pixels, alors qu'une deuxième famille d'algorithmes se concentre sur les écoulements se déplaçant librement aux alentours sur le MNT. Les algorithmes de la deuxième approche sont répertoriés comme des « Flow Tracing Algorithms » (direction simple d'écoulement - Kinematic Routing Algorithm ; direction multiples d'écoulements – DEMON). Les

méthodes de la première approche sont répertoriés comme les « Cell-Wise Flow Accumulation and Routing Algorithms » (direction simple d'écoulement - D8, Rho8 ; direction multiples d'écoulements - FD8, Dinf) avec la méthode D8 (Deterministic 8) comme la plus ancienne de toutes, et la plus utilisée dans l'ensemble des logiciels de SIG. **Chaque algorithme apporte un résultat très différent dans la délimitation des aires de confluence (ou de drainage) et doivent être choisi en fonction du contexte de terrain et des objectifs d'étude.**

SAGA est un logiciel Open Source sur le Net, très performant, et développé par l'université de Hambourg. Il propose trois méthodes d'implémentation du MNT pour la création du réseau hydrographique (Cinnemery, 2010) : « Parallel Processing » (du pixel le plus haut vers le plus bas), « Recursive Upward processing » (du pixel le plus bas vers celui de plus haute altitude), et « Flow Tracing » qui calcul le chemin d'écoulement (simple ou multi directionnel) pour chaque cellule. Autant dire que chacune des trois méthodes d'implémentation du MNT ne peut pas fonctionner avec tout types d'algorithmes, tout dépend de s'il accepte les simples ou multiples sens d'écoulement et de la logique de calcul. Ainsi les « Cell-wise flow accumulation and routing » se retrouvent dans les modules « Parallel Processing » et « Recursive Upward Processing », alors que les « Flow Tracing » sont dans le module du même nom. **La question du choix simultané de la méthode d'implémentation et de l'algorithme de calcul sont cruciaux pour la réalisation d'une carte du réseau hydrographique valable, et donc pour la définition des bassins versants dans une étape ultérieure.**

Le listing suivant reprend l'Etat de l'art (Cinnemery, 2010) relatif au logiciel SAGA, des différents algorithmes utilisables :

- « Deterministic 8 (D8) » : C'est l'approche la plus classique. Les écoulements vont du centre d'un pixel vers le centre de son voisin plus bas, à travers lequel le plus fort gradient est détecté. Cependant les directions d'écoulement sont restreintes à des multiples de 45°, ce qui constitue un des désavantages majeur de cette méthode (O'Callaghan and Mark, 1984).

- « Rho8 » : Le Rho8 ('Random eight node') est la méthode de Fairfield & Leymarie (1991). C'est une

version stochastique du D8. Un degré de randomisation est intégré dans le calcul des directions d'écoulements afin de produire une direction d'écoulement moyenne plus réaliste. Il permet également d'éviter des tracés parallèles d'écoulements souvent observés sur le D8.

- “Deterministic infinity (D^∞)” : La méthode s'appuie sur la représentation du sens d'écoulement comme d'un angle défini par la pente la plus importante des 8 facettes triangulaires centrées sur chaque pixel. L'écoulement est alors proportionnel entre deux cellules, à l'angle d'écoulement maximum vers le pixel sous-jacent suivant (Tarboton, 1997).

- “Braunschweiger Digitales Reliefmodell” : C'est un algorithme calculant de multiples directions d'écoulements. Un écoulement s'insère entre les cellules avoisinantes dont l'orientation est proche des aspects du centre de la cellule et en fonction des valeurs des deux cellules adjacentes (Bauer, Bork and Rohdenburg, 1985). Méthode en partie utilisée par Renno & al (2008) dans la production de l'indice HAND.

- “FD8” : Cet algorithme est une modification du D8, permettant des écoulements multiples. L'écoulement est distribué à l'ensemble des pixels voisins sous-jacent (direction d'écoulements multiples), avec les fractions d'écoulement transmis à chacun des voisins selon le poids de la pente (Freeman, 1991).

- « Kinematic Routing Algorithm (KRA) » : Le KRA est une méthode de « Flow Tracing » unidimensionnelle. Les écoulements se comportent comme une balle roulant vers le bas du MNT. Ses positions ne sont pas restreintes au centre de la cellule (Lea, 1992).

- “Digital Elevation Model Network (DEM-NON)” : C'est l'algorithme le plus complexe dans SAGA. C'est une méthode de « Flow Tracing » bidimensionnel produisant des écoulements ou des courants d'eau. Très demandeur en temps de calcul (Costa-Cabral and Burgess, 1994).

L'objectif de cette note, est de donner les méthodologies de création de trois variables destinées à une étude du site ONF de Counami, pour expliquer la répartition spatiale de l'AGB. Ces trois variables, HAND, potentiel gravitationnel, et zones inondables, ont été calculé pour chaque parcelle d'inventaire du site de Counami.

Cependant on ne peut tester leur valeur descriptive de la structure forestière des parcelles de Counami, sans poser un minimum de regard critique sur les méthodes utilisées et les choix effectués lors de leur création.

Matériel et méthodes :

Support d'étude :

En l'absence d'un réel modèle numérique de terrain (MNT) accessible sur l'ensemble du département, on utilise un modèle numérique de surface (SRTM) qui représente plus ou moins la surface de la canopée. Ce Modèle Numérique couvre l'ensemble de la Guyane avec une résolution spatiale de 30m ou 90m dans le plan et une imprécision verticale de 11m.

Le SRTM de Counami a été récupéré, selon un niveau de précision du pixel de 30 mètres.

Découpage du MNT :

La taille du site de Counami (environ 12 000 ha) ne nécessite pas la création d'une découpe avec tuilage du raster, censés alléger les calculs. Par contre un découpage du MNT s'est opéré autour de la limite du massif avec un Buffer de 800 mètres. Cette distance est considérée comme suffisante pour restituer convenablement les bassins versants chevauchant la limite. La taille des bassins versants visée pour l'expérience est relativement réduite, car destinée à faciliter l'association de chaque point parcelle à son cours d'eau de drainage fonctionnel.

Correction du MNT :

Une cuvette ou une dépression est un pixel ou un groupe de pixels avec une élévation plus faible que toutes les autres cellules avoisinantes. Les algorithmes de calcul utilisés en analyse hydrologique présentent des difficultés avec ces dépressions. Le module de SAGA « Terrain Analysis – Preprocessing » propose quatre méthodes pour prendre en compte ou supprimer ces trous.

Dans un premier temps, une grille de détection des dépressions (facultatif) a été créée, via le module « Terrain Analysis – Preprocessing/Sink Drainage Route De-

tection ». Elle prédétermine des zones de dépression sans réfléchir au sens d'écoulement, selon un calcul normalisé avec les valeurs des plus proches voisins. C'est un bon guide de calcul pour les étapes suivantes.

L'algorithme de calcul du module « Sink Removal » a été retenu car lissant parfaitement les reliefs, et surtout redessinant avec plus d'importance les lits de cours d'eau dans les zones relativement plane (interpolation de type FILL sur ArcGis), limitant ainsi les erreurs de tracer pour les calculs des étapes suivantes.

Une validation par soustraction de raster, utilisant le module « Grid - Calculus/Grid Calculator » a été réalisée pour analyser les points de changement entre les deux MNT. L'hypothèse de base de cette analyse est que des cuvettes et des dépressions existent sur le MNT de départ (SRTM_30m).

Création du réseau hydrographique :

Cette partie s'inspire des informations techniques apportées par Volker Wichmann et la rédaction du « SAGA User GUIDE » (2008), et Victor Olaya (2008). Elle vise à définir le réseau hydrographique à partir de méthodes déterminant les aires d'accumulation des écoulements (« flow accumulation area ») et les zones de confluence ou de drainage (« catchment area »). **Dans le cas d'une grille de pixels, cela revient respectivement pour chaque cellule à définir les zones constitutives de pixels proches et d'altitudes supérieures qui entraîneront un écoulement vers la cellule observée et l'aire de cette zone elle-même.** Ces zones sont représentatives en soi de micros aires de drainage et de micro bassins versants spécifiques. Dépendant de comment les écoulements seront calculés par l'algorithme, et de la méthode utilisée, le résultat des zones de confluence sera variable.

Dans un premier temps nous avons créé les zones de confluence en utilisant le module de SAGA « Terrain Analysis - Hydrology/Parallel Processing », nous appuyant sur le MNT corrigé et le « Sink Route » pour performer les calculs. L'algorithme « Multiple Flow Direction » a été utilisé, alors que les « Flow Tracing », de véritables boîtes noires, ont été mis de côté. Cet algorithme (un mélange de FD8 et Deterministic Infinity) a été choisi car il est l'un des plus accompli de sa catégorie,

qu'il est facile à paramétrer, et qu'il creuse bien les zones de confluence des nombreuses zones humides du site, apportant ainsi un peu plus de précision au réseau hydrographique créé dans l'étape qui suit. **La couche d'information produite correspond aux aires de confluence. Autrement dit c'est un peu plus que la simple prise en compte des lits de cours d'eau. Cela intègre les lames d'eau affleurantes ou peu profondes théoriques, et peut ainsi représenter un indicatif des zones inondées et/ou inondables (voir aussi RT 4).**

Dans un second temps la définition du réseau hydrographique a été opérée dans le module « Terrain Analysis - Channels/Channel Network ». Deux couches sont ainsi produites : une couche du tracé simple du réseau avec une coloration par importance de taille et/ou de débits des différents bras (« Channel Network »), et une couche du même réseau avec une colorimétrie et numérotation représentative de la direction d'écoulement selon les 8 axes directionnels possibles (« Channel Direction »). Le calcul s'appuie, comme précédemment, sur le MNT corrigé, sur le « Sink Route » et prend la carte des zones de confluence comme grille d'initiation des calculs. Le paramétrage du calcul sur la grille d'initiation a été calibré visuellement au regard du réseau hydrographique du CIRAD de Montpellier (qui va trop loin dans la précision) et celui de la BD_CARTAGE qui lui ne prend en compte que les axes fluviaux principaux. Le type d'initiation choisi est de type « supérieur à » un seuil de 5000. Cette dernière valeur quantifie le niveau de précision du tracé hydrographique, plus cette valeur diminue plus on aura de chance de prendre en compte des talwegs secs (comme la couche du CIRAD).

Une première phase de vérification qualitative comparant les deux réseaux hydrographiques en possession (CIRAD et BD_CARTAGE) au réseau obtenu a été réalisée.

Une deuxième phase de vérification terrain a été réalisée afin de retracer des portions de réseau hydrographique via GPS et de tester le réseau théoriquement développé via le SRTM_30m sur SAGA. La crique de la Coumani derrière le carbet de l'ONF a été suivie au GPS en mode trace (prise tout les 30 mètres), avec un point GPS supplémentaire pris en manuel environ tous les 20 mètres et aux intersections.

Création des bassins versants et développement de l'indice HAND et de Potentiel Gravitationnel :

L'indice HAND pour « Height Above Nearest Drainage » correspond au rapport de la différence altimétrique sur la distance entre un point donné et le point d'intersection de la crique sous-jacente la plus proche. Le potentiel gravitationnel lui correspond simplement à la différence d'altitude entre ces deux mêmes points. Dans notre situation sur le massif de COUNAMI, le point de référence correspond au centre de la parcelle.

Chaque segment du réseau hydrographique précédemment défini peut être associé à un bassin versant. Ce bassin versant correspond à la surface de confluence d'un point plus bas sur un segment, moins les bassins associés aux segments situés au-dessus.

Les segments de base (= bras de cours d'eau) ont été définis lors de la création du réseau hydrographique, les pixels des extrémités étant codés -1. **Voulant éviter que des criques physiquement aberrantes, car de l'autre côté de la montagne par exemple, soient prises en compte comme la crique la plus proche du centre d'une parcelle pour le calcul de l'indice HAND (voir schéma ci-après situation a' et b'), la définition des bassins versants et la définition de leur taille est cruciale. De même que la prise en compte d'un cours d'eau en aval de la parcelle pour le calcul de l'indice témoignerait d'une erreur de définition du drainage de la parcelle, la taille des bassins versants doit tendre vers le bassin hydrographique de chaque segment pour éviter cette erreur.**

La création des bassins versants a été réalisée à partir du module de SAGA « Terrain Analysis - Channels/Watershed Basins ». S'appuyant sur le MNT corrigé,

mais également sur le réseau hydrographique (« Channel NetWork ») et le « Sink Route », la taille minimale d'un bassin versant peu être paramétré. Ayant des espacements entre les parcelles de 400 * 500 mètres (soit une aire de 20 ha), en fonction de la taille moyenne des segments, et par calibrage visuel, un seuil de 100 pixels (9 ha) a été choisi.

L'étape suivante de calcul de l'indice HAND aurait pu être automatisée. Cependant dans un souci de rétrocontrôle de la méthode de définition des bassins versants, la manipulation a été opérée manuellement pour les 411 parcelles. Le MNT corrigé a été gardé en arrière plan, afin d'opérer des rectifications ponctuelles si nécessaires.

Développement de l'indice zone inondables

Les bas-fonds sont caractérisés par des structures forestières particulières. De faible hauteur, des diamètres réduits par le turnover imposé par les chablis, processus naturel de régénération en forêt tropicale, des croissances rapides grâce à un cortège floristique riche en héliophile ... et de plus faibles AGB. La couche informative relative aux aires de confluence, ou autrement dit « aires de drainages » ou encore « zones potentiellement inondables » peut donc apporter des explications dans la répartition spatiale de l'AGB. Une couche informative de la sorte existe sur le territoire de la Guyane (voir RT4), cependant sa valeur prédictive de l'AGB n'a pas été testée, ni sa capacité à décrire les structures forestières. Ainsi les deux couches sont comparées afin de, si possible, en retirer une information potentiellement intéressante pour l'étude de la Partie II.

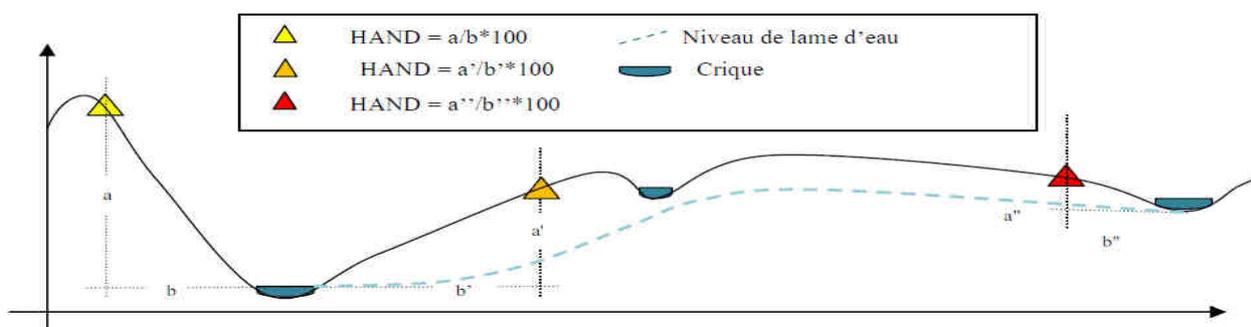


Figure 1 : Schéma de calcul de l'indice HAND ("Height Above Nearest Drainage")

Résultats :

Production d'un MNT corrigé

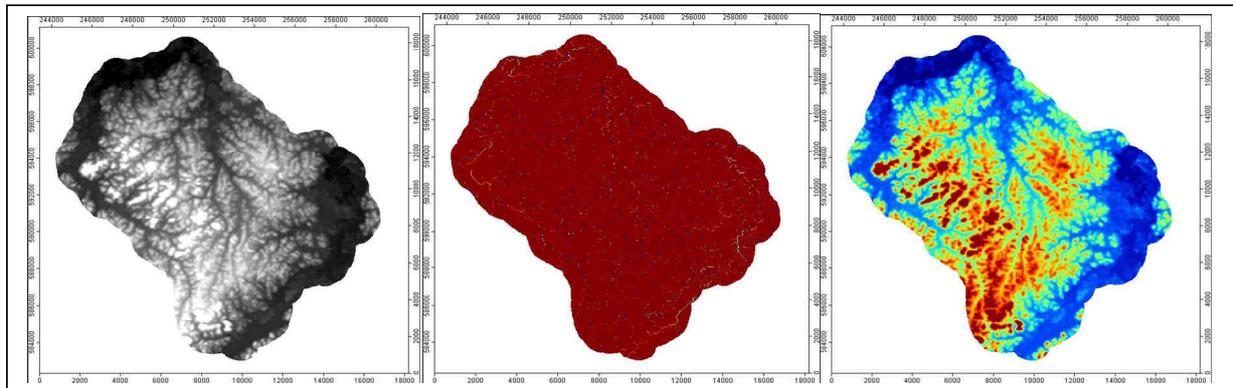


Figure 2 : trois couches SIG sur Counamí, de gauche à droite, SRTM 30m, détection des dépressions et cuvettes, et MNT corrigé - SAGA

Dans les graphiques ci-dessus, de gauche à droite : le MNT de la NASA (SRTM_30m), la couche de détection des dépressions, et le MNT corrigé. La production du MNT corrigé par de l'hypothèse qu'il existe bel et bien des dépressions et des cuvettes qui pourraient fausser la création de la couche hydrographique, avec des rivières pouvant terminer dans un trou.

A l'observation de la carte résultat de la soustraction des deux MNT (ci-contre), la correction semble être concluante et d'un large nécessaire. Des micros sites de correction apparaissent sur les reliefs, et un approfondissement de l'ensemble des réseaux avec un soin tout particulier sur les zones Sud-Est et Nord-Ouest, zone assez marécageuses aux abords de la Counamama et de l'Iracoubou, apparaissent. Pour illustrer le travail effectué par les algorithmes un zoom est effectué sur une zone de relief où une cuvette d'environ 120 mètres de larges a été corrigée. De gauche à droite l'on observe : la couche du MNT de départ de la Nasa, la couche du MNT corrigé et la couche de la soustraction des deux.

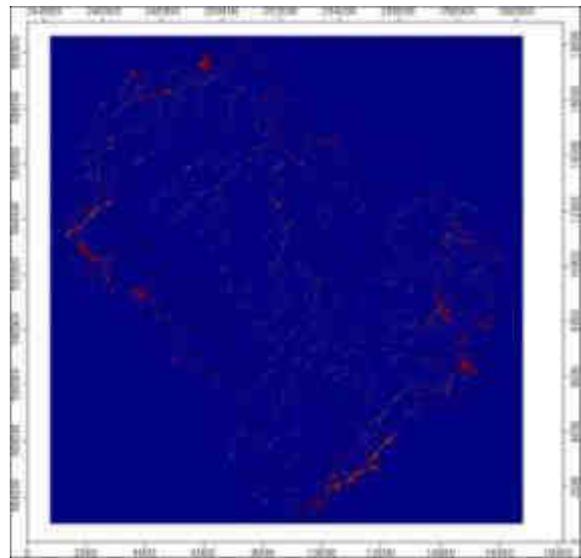


Figure 4 : Soustraction MNT corrigé - SRTM 30m sur Counamí - SAGA

La dernière couche indique ainsi le nombre de mètres d'altitude par pixel que le logiciel a ajouté pour corriger le MNT. Le MNT semble à ce stade bon pour la phase II de définition du réseau hydrographique

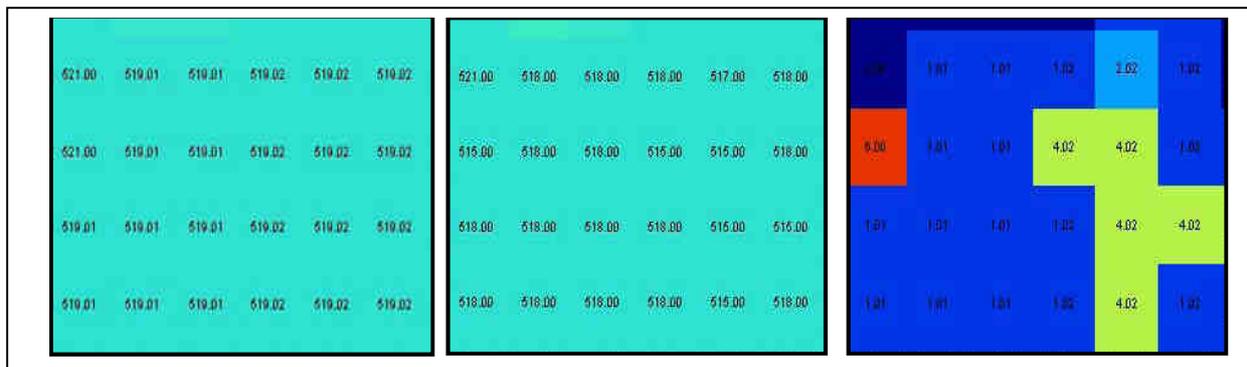


Figure 3 : Zoom exemple sur un microsite corrigé (de gauche à droite SRTM 30m, MNT corrigé et soustraction des deux) - SAGA

Création du réseau hydrographique :

La carte des zones de confluence a donc été produite. Ces zones de confluences sont importantes car précisent les sens d'écoulements et les zones potentiellement « hydromorphes » à proximité des cours d'eau. C'est un point d'amer pour la création du réseau hydrographique.

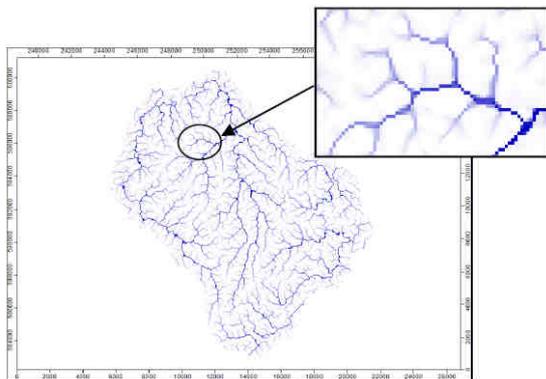


Figure 5 : Réseau et aires de confluences de COUNAMI - SAGA

A partir de cette carte il a donc été possible de créer les cartes du réseau hydrographique présentées ci-dessous. Ainsi de gauche à droite le réseau hydrographique donnant comme information l'importance du cours d'eau par sa couleur et l'indicatif numérique, et la carte du réseau hydrographique avec les sens d'écoulements des eaux selon 8 axes directionnels chacun avec un indicatif numérique et de couleur (figure).

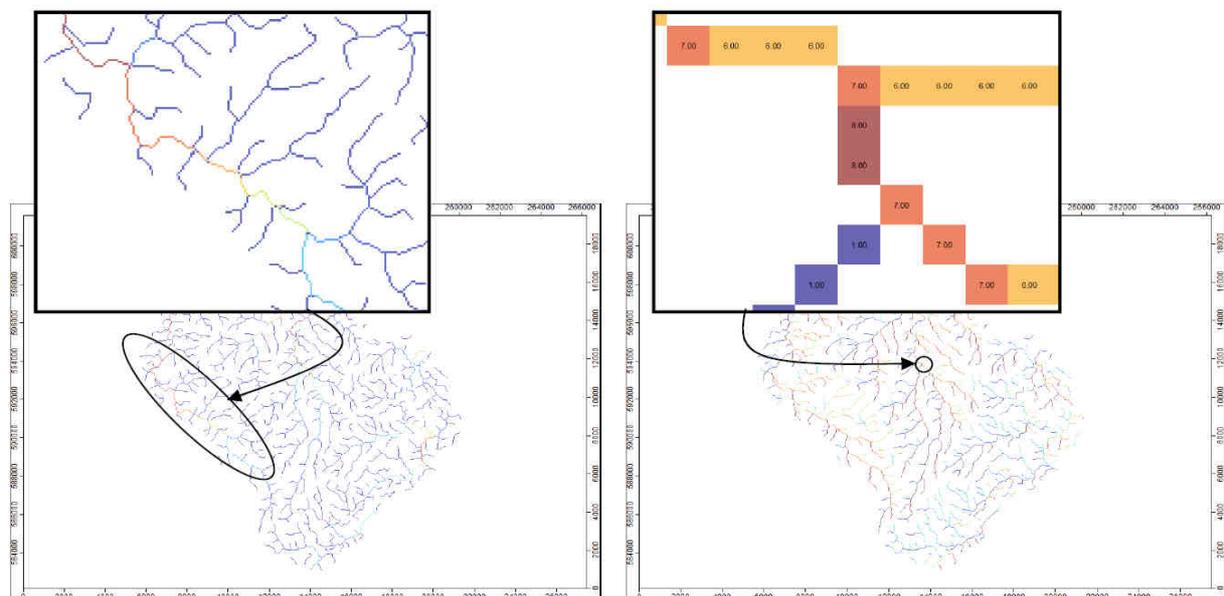


Figure 6 : Channel Network (à gauche) et Channel Direction (à droite) - SAGA

L'extrait de carte fourni ci-dessous, donne une appréciation visuelle des différentes couches du réseau hydrographique à présent disponible. Ainsi en vert la couche 'rivière de COUNAMI' fourni par le CIRAD de Montpellier, en bleue la couche régionale de la BD Carthage et en marron celle que nous venons de créer. Si l'on prend pour base d'analyse critique le MNT en arrière plan, support de la création des réseaux hydrographiques :

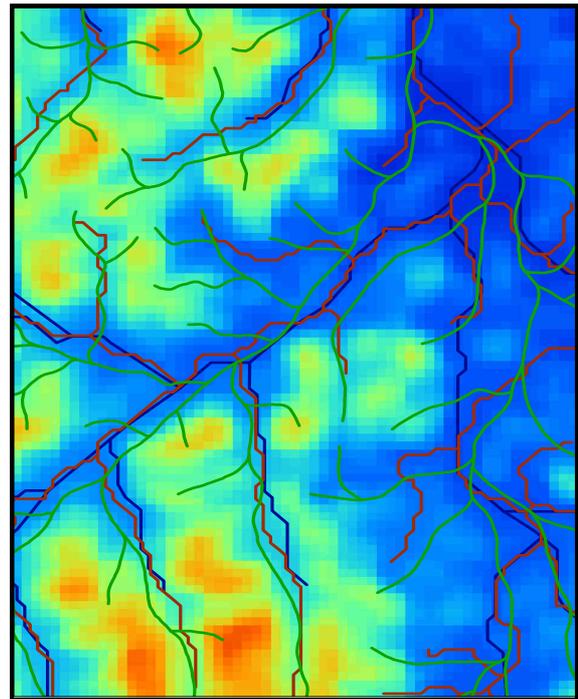


Figure 7 : Comparaison de 3 tracés du réseau hydrographique de COUNAMI (CIRAD en vert, BD_CARTAGE en bleu, SAGA en marron) – ArcGIS 9.3

- la couche verte (CIRAD) semble avoir ses bras secondaires et tertiaires qui ont subi une translation légère

vers le Sud. Elle présente de nombreuses aberrations de parcours (comme des criques sur des monts, et des cours d'eau traversant les reliefs). Cette couche va d'ailleurs trop loin dans le niveau de précision, puisqu'il semble que les criques sèches soient prises en compte.

- la couche bleue (BD_CARTAGE) semble suivre relativement bien la logique du MNT, avec cependant des imprécisions légères de parcours dans les bas-fonds. Elle ne représente cependant que les cours d'eau de débits majeur, et manque en ce point de précision sur la définition de petites criques.

- la couche marron (SAGA) se superpose bien à la couche bleue sur les cours majeurs et à la logique du MNT. Elle est un bon compromis de précision entre la couche verte et la couche bleue.

Au GPS, 6 380 mètres ont été suivis sur la crique Counami, représentant 3 900 mètres linéaires du tracer de SAGA. Le tracer en bleu ciel représente donc le vrai court d'eau, tracé manuellement à partir des points GPS, du Trace du GPS, et des photos aériennes en arrière plan, donc d'une grande précision (+/- 8 mètres sur le GPS).

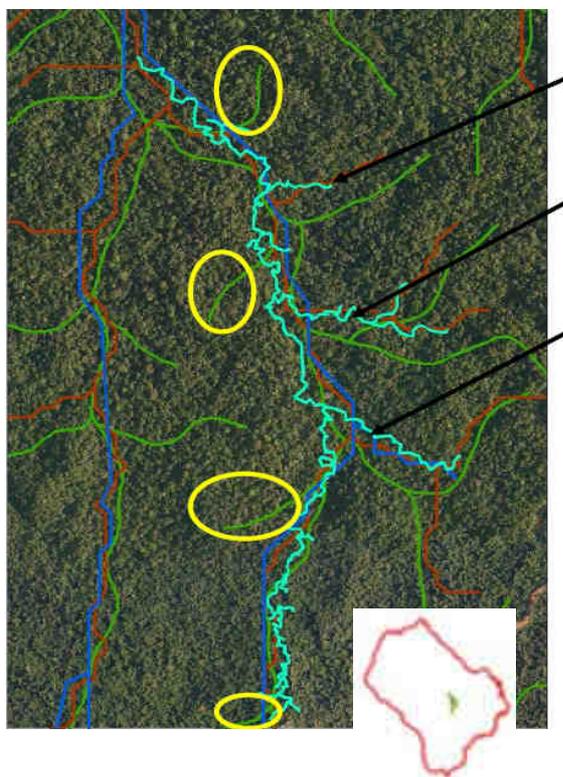


Figure 8 : Bleu ciel le tracer GPS d'une portion de la crique Counami – en vert le réseau du CIRAD – en bleu le réseau de la BD_CARTAGE – en marron le réseau de SAGA

Le site a été choisi pour deux raisons. Premièrement pour sa facilité d'accès. Deuxièmement parce qu'en tant que zone plane, très hydromorphe, nous nous positionnons dans une situation d'erreur extrême des algorithmes de calcul. Les cours d'eau suivis (en bleu ciel) présentaient tous un écoulement continu à la fin du mois d'août, à l'exception des criques sèches poursuivies dans la partie tiers Sud.

64,5% du tracer GPS est dans la zone définie par un buffer de 30 mètres du tracer de SAGA, et 98% à 70 mètres. Les résultats apportés corroborent les conclusions précédemment données. Le tracer de SAGA décèle bien les cours d'eau secondaire (flèches sur la carte ci-contre), et suit parfaitement les tracer lorsque les reliefs s'intensifient. Une critique est toutefois à apporter sur la qualité du tracer par SAGA dans les bas-fonds (soit le cours d'eau principal) qui semble osciller légèrement de part et d'autre du vrai tracer, tout comme le réseau de la BD_CARTAGE. Les sources d'erreurs proviennent majoritairement de ce tronçon principal. Pour le tracer du réseau du CIRAD, des criques sèches sont suivies, des criques sont créés et des trous dans le réseau apparaissent à deux endroits sur la carte. Le réseau développé sous SAGA, non parfait, propose le meilleur outil existant en Guyane pour développer l'indice HAND.

Création des bassins versants

La création du buffer autour du massif a permis d'éviter des créations de bassins versant erronés se chevauchant avec la limite de massif. Les zones en rose représentent ces bassins versants chevauchant, calculé par défaut, mais n'ayant aucune validité terrain. Ils se retrouvent à 100% des pixels en dehors des limites du massif (ligne jaune), et 100% des bassins versants du massif et chevauchant la limite sont complets.

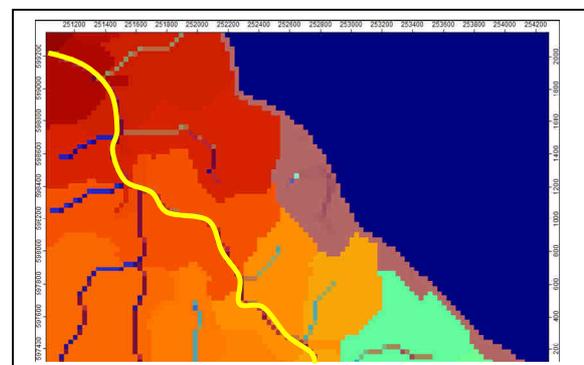


Figure 9 : Côté Ouest du massif de Counami, exemple d'un bassin versant erroné calculé en dehors de la limite du massif.

Développement de l'indice zone inondables

La création des bassins versants s'est bien appuyée sur la limite des segments de base (figure ci-après), pouvant cependant intégrer plusieurs segments dans un même bassin versant lorsque les logiques topographiques l'imposent (cas des pattes d'oies lorsque deux criques se rejoignent, cercle sur la figure ci-dessous).

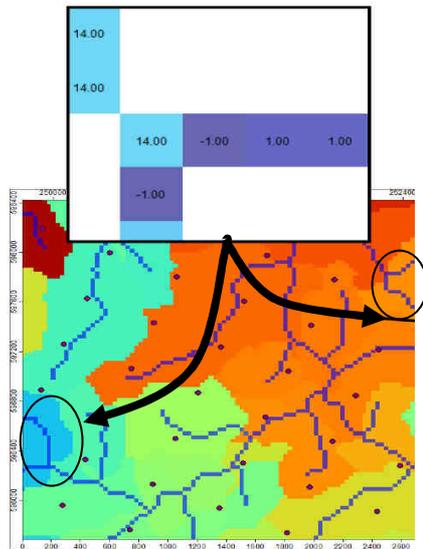


Figure 10 : Extrait du design des bassins versant du massif forestier de Counami

Lors de la création manuelle de l'indice HAND, avec appuis visuel arrière de la couche des bassins versants et du MNT, seulement 4% des placettes ont été redirigées vers un autre bassin versant de proximité et un autre segment de cours d'eau que celui proposé. Trois situations particulières expliquent majoritairement ces changements :

- une erreur probable dans le dessin d'un bassin versant (erreur lié aux segments de toute petite taille)
- une position étroite du centre de la parcelle sur une crête, indiquant un choix difficile entre lequel des deux versants l'eau doit s'écouler. Le choix s'est généralement tourné vers le versant de plus forte pente.
- une position peu judicieuse du centre de la parcelle à la frontière de deux bassins versants, c'est alors la disposition des 0,3 ha de la parcelle dans l'espace qui permettait trancher.

L'ONF a mis à disposition une couche d'information SIG sur les zones inondables, dont la méthodologie de développement est présentée dans la RT4. La carte « Catchment area » développée sur SAGA, présente la même logique démonstrative. Cependant dans l'optique de l'étude principale, nous avons comparé le pouvoir explicatif envers l'AGB de ces deux couches.

La couche de l'ONF est trop accentuée dans la définition des zones inondables, de ce fait trop de points sont pris en considération. Les boxplots présentés ci-dessous témoignent de l'absence d'information qu'apporte cette couche dans l'explication des valeurs de l'AGB.

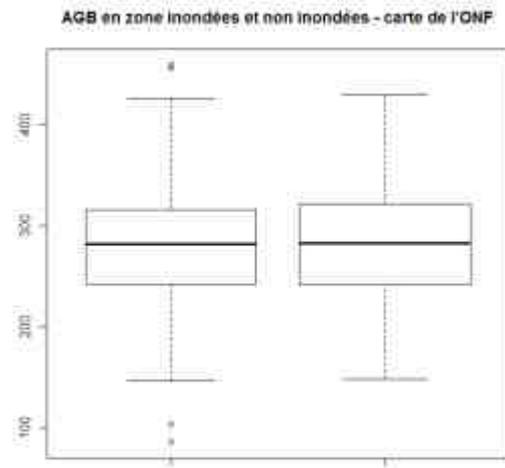


Figure 11 : Boxplots des valeurs de l'AGB des inventaires de Counami en zones non inondables à gauche et inondables à droite, selon la définition de la carte de l'ONF.

N'ayant aucune littérature pouvant expliquer l'interprétation des valeurs des pixels de la couche « Catchment Area » développée sur SAGA, plusieurs seuils définissant les zones inondables des non inondables ont été testés. Le seuil de 10 000 a clairement mis en évidence de comportement, en fonction de l'engorgement ou non des sols, des valeurs de biomasse forestière. En cherchant un peu plus loin la valeur de 10 000 à été retenue pour différencier les conditions d'engorgement de sols amenant à des moyennes de 267,14 T/ha pour les zones inondées et de 286,57 T/ha pour les zones non inondées.

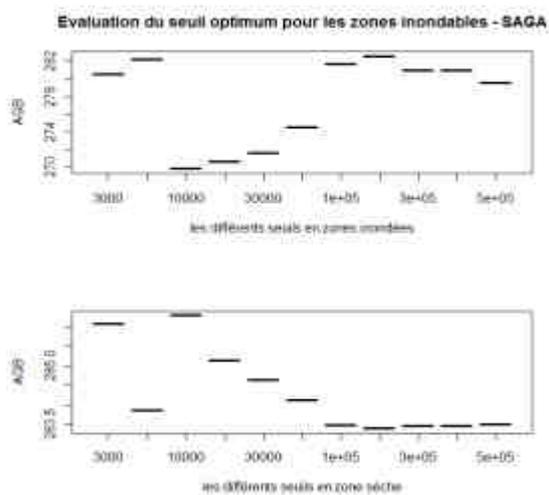


Figure 12 : Evaluation de la valeur de raster jouant sur l'AGB pour la carte des zones inondables - SAGA

Un test de Student confirme que les deux échantillons sont différents ($t = 2.8353$, $df = 114.951$, $p\text{-value} = 0.005411$).

Discussion :

Nous avons ainsi mis au point un réseau hydrologique de Counam plus précis que les couches pré existantes. Cependant une erreur liée à la taille du pixel, n'est pas négligeable lorsque l'on étudie l'écologie forestière à travers des indices spatialisés à l'échelle d'un petit massif.

Présentant quelques imprécisions dans les bas-fonds, on soupçonne que la précision soit de très bon niveau sur les reliefs de la montagne de Counam. Un tracé GPS sur cette zone permettrait de confirmer cela.

L'on peut s'attendre malheureusement à un certain niveau d'erreur au niveau de l'indice HAND et son pouvoir explicatif des valeurs des AGB de l'inventaire de Counam, surtout dans le bas-fond.

Dans le diagramme ci-après sont observées les erreurs sur l'indice HAND dans deux situations :

- en rouge un terrain où l'altitude augmente un peu avec la distance au court d'eau
- en jaune un terrain plus plat où l'altitude augmente lentement avec l'éloignement.

Les erreurs de 30 mètres et de 70 mètres ont été calculées dans les deux situations. L'erreur de l'indice augmente avec la proximité d'un réseau erroné. Pouvant conduire à des aberrations si le centre de la parcelle est très proche. Cependant les erreurs de calcul sur le HAND

sont moins fortes dans les zones hydromorphe (jaune), secteur où SAGA produit le plus haut niveau d'imprécision du réseau hydrographique.

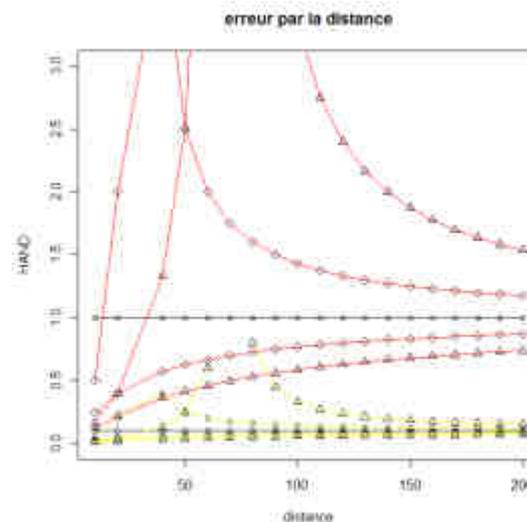


Figure 13 : Erreurs engendré par un mauvais positionnement du réseau de SAGA dans le calcul du HAND : +/- 30 mètres (losanges) et +/- 70 mètres (triangles) ; en jaune une situation de zone marécageuse et en rouge une situation de relief plus accentué.

On peut donc estimer que si l'indice HAND, devait faire ressortir une tendance dans la répartition de l'AGB, le niveau d'erreur est suffisant. Par contre si l'on doit rentrer dans du prédictif, la méthode n'est pas suffisamment puissante et précise à cette échelle.

Le LIDAR et la radiométrie pourraient constituer des outils honorables dans le design d'un MNT très précis. Supprimant les erreurs liées à la taille du pixel, et l'imprécision altitudinale du SRTM de la NASA, ces instruments pourraient permettre de dessiner un réseau hydrographique de grande précision.

L'ONF propose une couche des zones inondables, trop laxiste. Elle peut être intéressante dans la définition de gradients et de compositions floristiques spécifiques, mais elle n'est pas assez contraignante au regard de l'AGB. La prise en compte des valeurs extrêmes de pixel de la couche du « Catchment Area » de SAGA, amène à une différence significative des AGB. Cependant les parcelles concernées ne sont pas tout à fait les mêmes que celles définies comme hydromorphes lors de l'inventaire de terrain. Il semblerait que ces valeurs extrêmes représentent des situations de fort encaissement et/ou hydromorphes.

Références :

- Bauer J. Rohdenburg H. & Bork H.R. 1985. Ein Digitales Reliefmodell als Voraussetzung fuer ein deterministisches Modell der Wasser- und Stoff-Fluesse. In: Bork, H.R. & Rohdenburg, H. (eds.) *Parameteraufbereitung fuer deterministische Gebiets-Wassermodelle, Grundlagenarbeiten zu Analyse von Agrar-Oekosystemen*. pp. 1–15. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, DE.
- Cinnemery., 2010. User Guide Document for SAGA GIS. TOME II. 380 p. Document de formation.
- Costa-Cabral M.C. et Burges S.J., 1994. Digital elevation model networks (DEMON): a model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Res.* v. 30 no. 6 (1994), pp. 1681–1692.
- Fairfield J. et Leymarie P., 1991. Drainage Networks from Grid Digital Elevation models, *Water Resources Research*. Vol. 27, No. 5, 709-717.
- Freeman T.G. 1991. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computers & Geosciences* v. 17 no. 3 (1991), pp. 413–422.
- Lea N.J., 1992. An aspect-driven kinematic algorithm. In 'Overland flow': hydraulics and erosion mechanics. Edited by: Parson, A. J. and Abrahams, A. D., UCL Press, London, 393–407., Marks D. Dozier J. et Frew J., 1984. Automated basin delineation from digital elevation data. *Geoprocessing*, 2, 299-311.
- O'Callaghan J. et Mark D., 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer vision. Graphics and image processing*, 28, 323–344.
- Tarboton D.G. et Ames D.P., 2001. Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data, in: *Proceedings of World. Water and Environmental Resources Congress*, Orlando, Florida,
- Tarboton D.G., 1997. A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models. *Water Resources. Res.* 33(2), 309–319.
- Su Z. Neuman P. Fett W. Schumann. A. Scultz G.A., 1992. Application of remote sensing and geographic information system in hydrologic modeling. *EARSel Advances in Remote Sensing*, Vol.1, No.3 – VII, 180-186.
- Thommeret N. Bailly J.S. Puech C., 2010. Extraction of thalweg networks from DTMs: application to badlands. *Hydrology and Earth System Sciences* 14, 1527-1536.
- Volker Wichman, 2008. SAGA User. TOME I. 420 p. Document de formation.
- Olaya V., 2008. SEXTANTE, a free platform for geospatial analysis.

RT N°4 : INDICE DES ZONES INONDABLES DE L'ONF - CARTE DE GEOMORPHOLOGIE DE LA GUYANE.

Introduction :

Cette note est un extrait modifié du travail et du rapport de JM Carroza, document produit le 20 juin 2008. Le document dans son intégralité est intitulé : « **Eléments méthodologiques pour une cartographie géomorphologique de la Guyane - Etude relative au schéma minier** ». Seule une partie du document est exploitée ici, notre objectif s'arrêtant à une étape de développement d'un outil qui était un nécessaire pour aboutir à la création de la carte de géomorphologie : **la cartographie des zones inondables.**

Cette étude s'inscrivait dans le cadre du projet de recherche « Paysage et Biodiversité ». Les unités de paysage sont définies comme des entités régionales caractérisées par une géomorphologie dominante ou l'association et la répétition d'éléments géomorphologiques particuliers. L'étude visait donc à réaliser une cartographie des unités de paysage pour l'ensemble des forêts aménagées de Guyane. L'échelle de travail était donc prioritairement régionale en s'intéressant particulièrement à la partie Nord du département dans un premier temps. Les attentes relatives à la mise en place d'un schéma minier pour la Guyane nécessitent dans le même temps d'établir une cartographie de la biodiversité à l'échelle du département. La géomorphologie a donc été naturellement mise en avant comme un outil de cartographie ad hoc permettant de stratifier l'espace forestier, afin de rendre compte de sa biodiversité à travers la diversité des habitats naturels.

Ce travail originellement cantonné à la zone Nord-Est du territoire de la Guyane, dans le cadre du projet EcoTrop, a été par la suite étendue à l'ensemble du département à travers le projet déposé et validé sur le PO-

FEDER : **programme « habitat » (ONF, PAG & ONCFS).**

Dans le cadre de l'étude précédemment explicitée, visant à étudier les variables environnementales pouvant expliquer la répartition spatiale de l'AGB, la variable constitutive des zones inondables de Counami a été retenue comme pouvant être potentiellement explicative et/ou prédictive (Com. Pers. Guitet et Brunaux). Cette couche d'information SIG représente à la fois les zones potentiellement en eau (lits majeurs et mineurs de criques et rivières) et des zones où la lame d'eau est potentiellement affleurant ou peu profonde. Cette note explique brièvement le processus (assez ressemblant du RT3) de création de cette information.

Matériel et méthodes :

En l'absence d'un réel modèle numérique de terrain (MNT) accessible sur l'ensemble du département, on utilise un modèle numérique de surface (SRTM) qui représente plus ou moins la surface de la canopée. Ce Modèle Numérique couvre l'ensemble de la Guyane avec une résolution spatiale de 30m dans le plan et une imprécision verticale de 11m. Il sert de base dans l'analyse réalisée à différentes échelles (biome, domaine biogéographique, région naturelle, massif, station, parcelle) auxquelles correspondent en parallèle différents niveaux hiérarchiques des zonages écologiques.

Traitement préalable du MN

Découpage du MN : découpage du MN en 71 zones de 100 km x 100km avec tuilages vertical et horizontal de 50 km afin de faciliter le traitement intégral du département (macro AML : 1_Carroyage_Guyane.aml)

Estimation de l'élévation des pixels de valeur spéciale (valeur = -32767) codant pour NoData : estimation contextuelle reposant sur l'analyse de l'écart interquartile de l'élévation (EIQE) observée dans une zone tampon de 300m avec interpolation de type SPLINE si la l'EIQE > 30m ou de type FILL le cas échéant, le but étant de d'extraire les zones fluviales relativement plane peu propices à un traitement de type SPLINE + validation du tuilage (macro AML : 2_NoData_Guyane.aml, backup1)

Traitement des imperfections régulière du MN :
application d'un double filtrage gaussien sur une fenêtre rectangulaire de 3x3 pixels et de paramètre sigma = 1 (taille, forme et sigma paramétrables) + validation du tuilage. Le filtrage intermédiaire est conservé à titre préventif (macro aml : .3_Lissage_Guyane.aml, backup2).

Remplissage des cuvettes pour les traitements hydrologiques : remplissage standard avec la procédure FILL d'ArcInfo + validation du tuilage. Les versions hydrologiquement non corrigées sont conservées (macro aml : 4_Cuvettes_Guyane.aml, backup3)

Extraction du réseau hydrologique

Extraction du talweg par accumulation de flux (seuil : 75 pixels). Identification unique pour chaque tronçon du talweg. Calcul de l'ordre de Stralher et de Shreve pour chaque tronçon.

Extraction du réseau hydrologique à partir de l'extraction du talweg en éliminant les tronçons de moins de 100m sur le premier niveau d'ordre de Stralher.

Extraction des bassins versant

Détermination des points de confluence (pour chaque tronçon hydrographique, le pixel ayant la même valeur d'élévation, ou d'accumulation de flux que la plus

petite valeur zonale sur le tronçon).

Extraction des bassins versants (routine d'ArcINFO).

Extraction des zones inondables ou hydromorphes

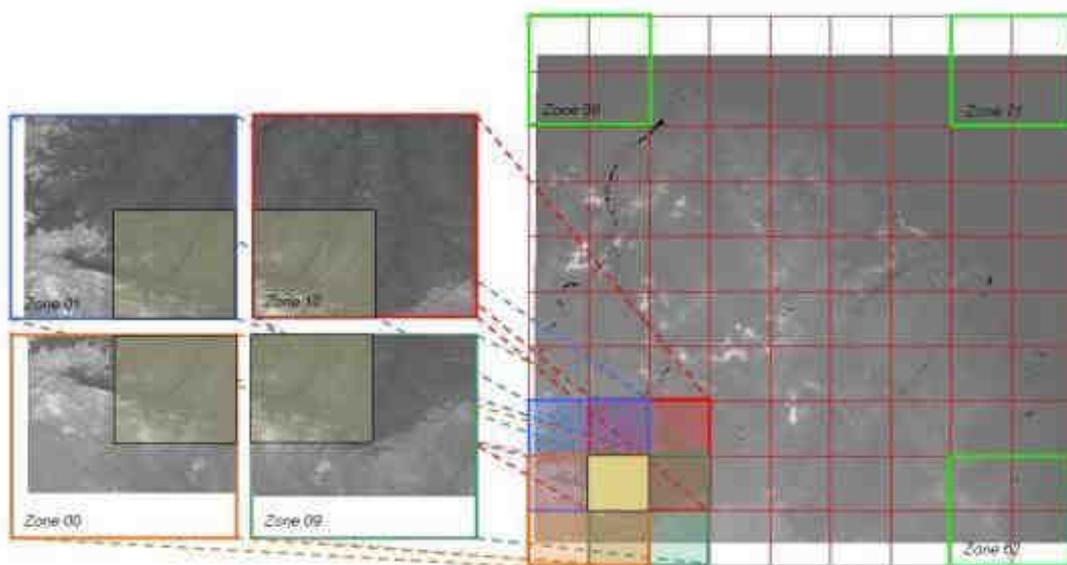
Création d'un identifiant unique pour chaque pixel du réseau hydrographique (en considérant le seuil d'accumulation de flux de 100). Création des zones de drainages pour chaque pixel du réseau hydrographique (à partir de la routine ArcINFO *watershed*).

Sélection, pour chaque zone de drainage, des pixels ayant une élévation inférieure ou égale à l'élévation la plus faible (pixel du réseau) observée sur la zone de drainage augmentée de 2 mètres. Ce qui donne l'ensemble des pixels ayant un dénivelé inférieur ou égal à 2 m - et respectant le modèle d'écoulement d'ArcINFO - par rapport au pixel drainant appartenant au réseau hydrographique.

Résultats :

Traitement du MNT.

(Schémaci-dessous)



Le découpage permet de faciliter le traitement du MNT (gestion de ressources matérielles) et le tuilage assuré pour chaque pixel une analyse focale de 25 km (important pour analyse hydrologiques ou de situation régionale). Toutefois, ce choix pratique se traduit par des traitements redondants pour un bon nombre de pixels (jusqu'à 4 fois).

Figure 1 : Découpage du MNT en quadrant de 50 km x 50 km et recomposition des 72 zones de 100 km x 100 km avec un tuilage de 50 km verticalement et 50 km horizontalement

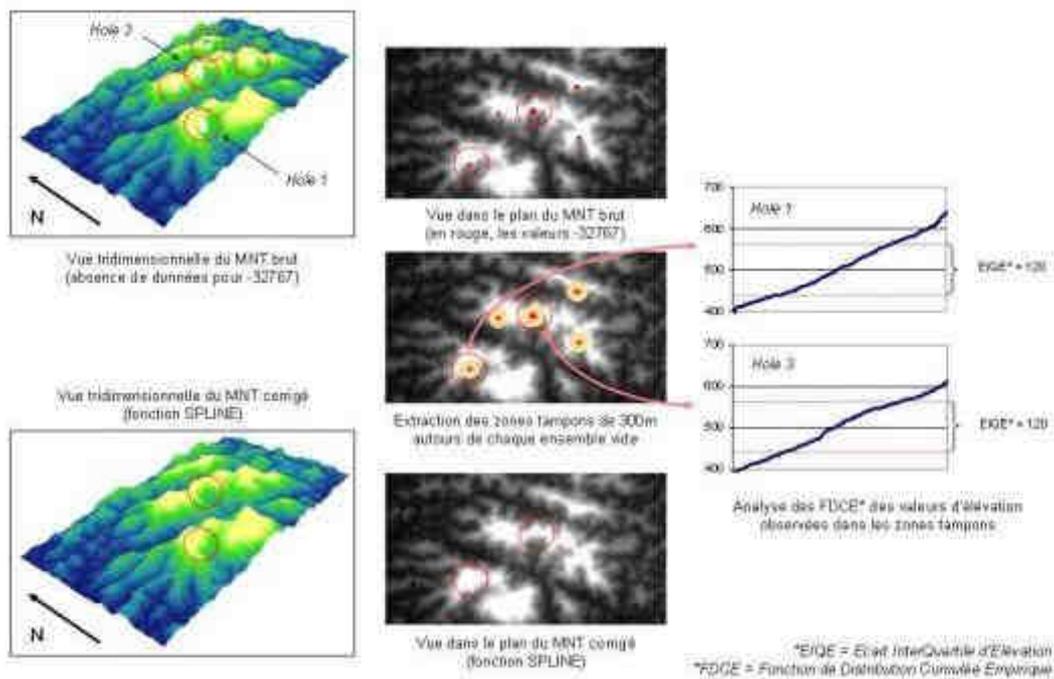
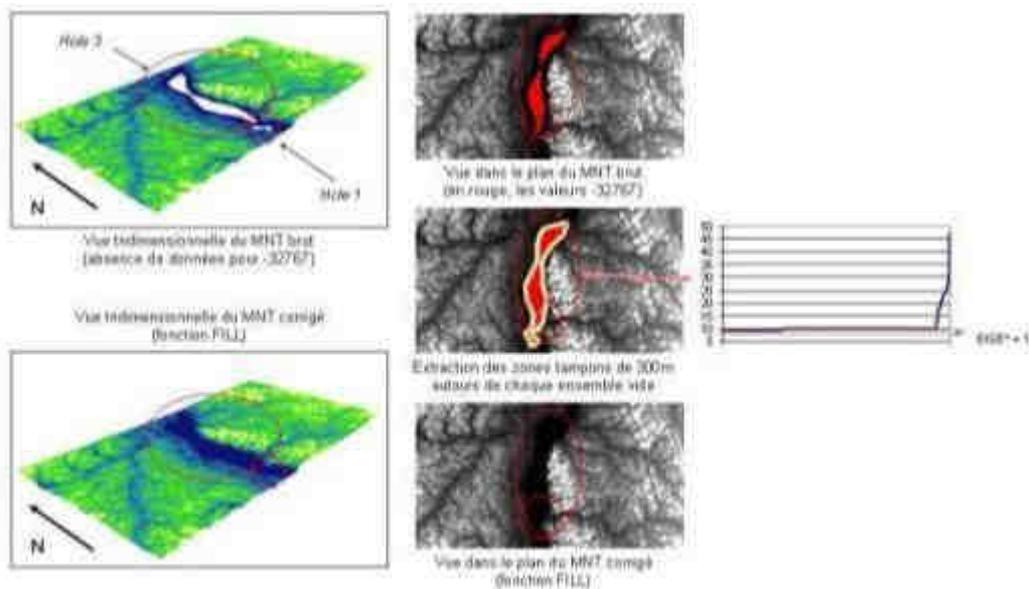


Figure 2 : Estimation de l'élévation des pixels de valeur spéciale (valeur = -32767) codant pour NoData - Cas de figure pour les zones au relief suffisamment découpé (EIQE > 30m)



Dans le cas de zone particulièrement plane, la quasi absence de dénivellation peut empêcher le bon déroulement de l'estimation de la fonction SPLINE (problème de colinéarité). Dans une perspective de traitement automatique, la procédure se trouve alors mise en échec. Bien qu'il serait envisageable de prospector une zone tampon plus large, la solution retenue – plus rapide – consiste à remplir la zone sans valeurs comme une cuvette. Le résultat est assez satisfaisant car rapide et recréant un relief plat.

Figure 3 : Estimation des pixels de valeurs spéciales (valeur = -32767) codant pour NoData - cas de figure pour les zones de relief faiblement découpé (EIQE < 30m)

Extraction des zones inondables ou hydromorphes

Un travail assez similaire sur le fond au travail fourni dans la note sur l'indice HAND a été réalisé dans le cadre du développement du réseau hydrographique. Ces étapes préparatoires ont permis de développer la carte suivante définissant les zones inondable. Une représentation cartographique en est proposée ci-dessous (zone ne noir) super posée au SRTM_30m de la Nasa sur le site spécifique de Counami (avec un buffer de 800 m).

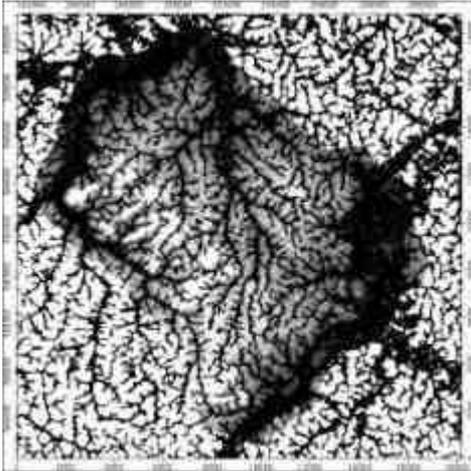


Figure 4 : Carte des zones inondables de Counami, superposé au SRTM_30m de la zone avec un buffer sur 800 m.

Comparaison avec le réseau hydrographique développé sur SAGA

La carte ci-après reprend le même type d'analyse visuelle que dans le RT 3. L'on se rend bien compte que le réseau vert (celui de la Guyane et de la BD Cartage) suit bien les cours d'eau principaux, que le réseau bleu (celui du CIRAD de Montpellier) est imprécis à l'échelle d'observation proposée sur la carte, et que le réseau marron (celui développé précédemment via SAGA) suit parfaitement la couche des zones inondées.

Cependant le réseau des zones inondées de l'ONF, correspond au « catchment area » ou surfaces de confluence développées dans le RT 3. Il se trouve que sur la couche d'information de l'ONF 246/608 placettes (153/411 dans l'analyse du rapport principal) se retrouvent sur les zones inondées, alors qu'avec la couche développée sur SAGA seulement 73/608 placettes se retrouvent dans les zones de drainage (valeur seuil > 10 000).

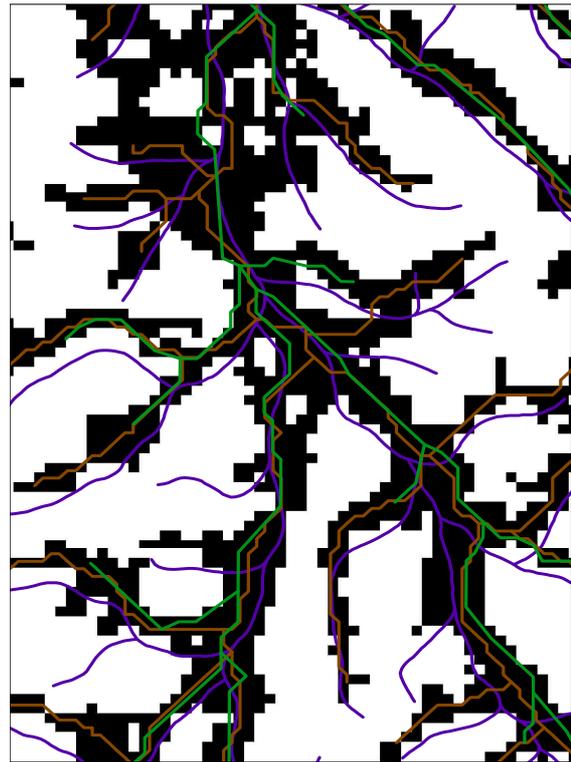


Figure 5 : Extrait du site de Counami mettant en confrontation les zones inondées définies par l'ONF (noir), le réseau hydrographique fourni par le CIRAD de Montpellier (bleu), par la BD_CARTAGE (vert) et par SAGA (marron)

Discussion :

Ainsi par un autre logiciel et une autre méthodologie l'on arrive à la même spatialisation des circuits d'eau de Counami, dont l'un a été validé par une phase de terrain au GPS. Le tracer global de cette couche des zones inondées semble juste sur une approche visuelle qualitative. Elle reste logique puisque les zones de fortes hydromorphies, c'est à dire aux abords de la Counamama (Sud-Est), de la Counami (en diagonale) et de l'Iracoubo (Nord-Ouest) s'épaississent fortement. Néanmoins l'algorithme utilisé sur ArcMap est très basique, et le SRTM utilisé est à 90m de résolution du pixel. Il suffit pour tracer la forme globale des cours d'eau mais le tracer produit sur SAGA semble plus proche de la réalité. Malgré les apports personnels de Stéphane Guitet et Olivier Brunaux sur la validité terrain de cette couche, une imprécision forte par excès est à souligner (voir aussi RT3 – création variable zone inondée). Effectivement, le seuil de 2 mètres est beaucoup trop élevé, et les zones inondables sont exagérées surtout sur les reliefs. D'où une non expressivité de cette variable dans l'étude principale.

Résumé :

Dans un objectif de recherche des déterminants de la spatialisation des services rendus par les écosystèmes forestiers, les questions de définition des unités paysagères de référence et les changements d'échelles sont primordiaux. Nous avons opéré dans la continuité du travail fourni récemment en Guyane par la carte des habitats (Guitet, à paraître), définition qui part du postulat qu'une typologie géomorphologique, donc une approche paysagère, permet de définir des conditions homogènes représentatives d'un habitat (composition floristique, structure...). C'est ainsi que 6 grandes formations géomorphologiques regroupent 12 unités paysagères, constituées de 84 unités de reliefs.

Nous avons profité des inventaires du site de Counami (411 placettes de 0.3 ha sur 12 240 ha) comme cas d'étude, nous plaçant ainsi sur une unité de relief particulière représentative d'un habitat spécifique. Cet inventaire systématique à fort taux de sondage, est un cadre idéal pour tenter d'expliquer les structures forestières en fonction des conditions environnementales. Ainsi chaque parcelle a été caractérisée, lors de sa création dans les années 1999, par un certain nombre de descripteurs écologiques semi-quantitatifs, auxquelles nous avons ajouté des variables issues du SIG et de la télédétection. **L'objectif de la présente étude est de définir les variables environnementales qui permettent d'expliquer la variabilité spatiale de la biomasse à l'échelle d'un massif.**

Un fort gradient de biomasse se dessine le long de la toposéquence du massif de Counami. De la même sorte, de nombreuses variables semblent liées à cette topographie, nous incitant ainsi à définir des stations forestières caractérisées par la position topographique, amenant à une autre segmentation du territoire à une échelle plus fine. Les variables qui expliquent en partie la spatialisation des niveaux de biomasse sont principalement : la position topographique et les pentes, la carte des chablis, l'hydromorphie apparente pour les bas-reliefs et l'hydromorphie sous-terrain pour les reliefs, l'encaissement localisé, les grandes formations forestières, l'indice SIWSI (Short Infrared Water Stress Index) et l'indice EVI (MODIS-Enhanced Vegetation Index). D'autres indices pressentis comme intéressants, ont eu des résultats décevants : carte des zones inondables, HAND (MODIS-Height Above Nearest Drainage). **Les objectifs à plus longs termes sont de tester ces variables, et d'en intégrer d'autres (conditions climatiques par exemple) pour comprendre la variabilité spatiale de la biomasse dans les autres unités de reliefs et unités paysagères afin d'aboutir à une carte de la biomasse à l'échelle de la Guyane.**

Mots clés : Carbone, biomasse, AGB, modélisation, topographie, géomorphologie, Guyane, hydromorphie, géologie, physiographie, phénologie, MODIS, SIG, SAGA, SRTM, EVI, SIWSI, NDVI...

Abstract:

In a research objective to determine spatialization of services provided by forest ecosystems, questions of definition of landscape reference units and scaling are paramount. We operated in the continuity of the work done recently in Guyana by the map of habitats (Guitet, forthcoming), a definition that leans on the postulate that a geomorphologic typology, so landscapes approach, can define homogeneous conditions representative of a habitat (species composition, structure ...). Thus six major geomorphological features include 12 landscape units, consisting of 84 units of reliefs.

We took inventory of Counami site (411 plots of 0.3 ha on 12 240 ha) as a case study, placing in a special relief unit representing a specific habitat. This systematic inventory with a high sampling rate is an ideal place to try to explain the forest structures depending on environmental conditions. Thus each plot was marked at its inception in the year 1999, with a number of semi-quantitative environmental descriptors, which we added variables from GIS and remote sensing. **The objective of this study is to identify environmental variables that explain the spatial variability of biomass at the scale of a forest.**

A strong gradient of biomass emerges along the toposequence of Counami's forest. In the same way, many variables appear to be related to the topography, prompting us to define forest stations characterized by topographic position, leading to a further segmentation of the territory to a finer scale. The variables that partly explain the spatialization of biomass' levels are mainly: the topographic position and slope, the tree fall's map, the apparent hydromorphy conditions for low reliefs and under-ground waterlogged for highest reliefs, the enclaved sites, the major forest formations, the index SIWSI (Short Infrared Water Stress Index) and the index EVI (Enhanced Vegetation Index). Other variables previously found to be promising, have had disappointing results: map of flood zones, HAND (Height Above Nearest Drainage). **The longer term objectives are to test these variables, and to integrate other (eg weather conditions) to understand the spatial variability of biomass in other units of landforms and landscape units in order to achieve a biomass map across Guyana.**

Keywords: Carbon, biomass, AGB, modeling, topography, geomorphology, Guyana, hydromorphy, geology, physiography, phenology, MODIS, SIG, SAGA, SRTM, EVI, SIWSI, NDVI...